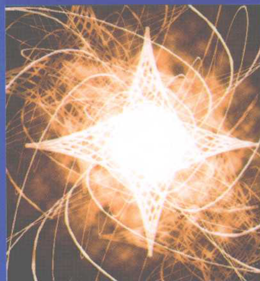
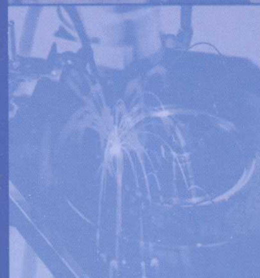


国际机械工程先进技术译丛









先进焊接方法与技术

Advanced Welding Processes
Technologies and Process Control

（英）John Norrish 著

史清宇 陈志翔 王学东 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

先进焊接方法与技术

（英）John Norrish 著

史清宇 陈志翔 王学东 译



机 械 工 业 出 版 社

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化的机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三个方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流渊源流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

（1）精品重点高质　本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

（2）专家选译把关　本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

（3）引纳地区广泛　主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

（4）内容先进丰富　在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

（5）读者层次面广　面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、

研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

焊接方法在工业生产中具有广泛的应用，但焊接过程的复杂性使得这一生产过程严重依赖于操作者的技能，这无疑影响了焊接结构的一致性和可靠性，同时生产效率低下。在我国这种现象尤为严重。

众所周知，由于不同材料和结构对制造方法多样性的需求产生了种类繁多的焊接方法，在一本书中对这些焊接方法都进行全面的阐述无疑是不现实的。

本书结合焊接领域近年来的研究成果，一方面针对现代生产中焊接的共性技术问题进行了全面的介绍，包括焊接材料，焊接保护气体，焊接电源等；另一方面，针对现代生产中的先进焊接方法开展了讨论，这些方法既包括已经得到广泛应用的钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊，也包括具有较强针对性的高能束焊接方法和窄间隙焊接方法；最后本书对焊接过程的监测与控制，焊接自动化与机器人进行了介绍。本书内容中虽然包含一些传统焊接领域的基本问题，但却以相关领域的最新进展为主，这些新进展不但对我国焊接生产中制订或改善工艺具有重要的借鉴作用，也从一个侧面反映了西方发达国家在焊接领域所从事的扎实而系统的研究，对广大焊接研究者也具有一定的参考价值。

本书第一、二、四、五、六章由史清宇翻译，第三、七章由王学东翻译，第八、九章由鄢东洋翻译，第十、十一章由陈志翔翻译。由于译者水平有限，书中难免有错误和不足之处，望读者批评指正。

译 者

前　言

传统上焊接更多地被认为是一种技艺而不是技术性很强的制造方法。很多传统焊接方法严重依赖于操作人员的熟练程度，还有很多传统焊接方法相对生产成本较高而且工艺重复性很差，这些加深了上述的传统观念，同时也导致焊接在国际质量标准中被列为特殊工艺。但事实上，虽然焊接过程可能是一个多物理场耦合的复杂过程，国际上仍然开展了大量的高水平研究，人们对焊接过程中的很多基本物理现象有了更深入的了解，这些研究为焊接工艺技术的飞速发展提供了科学基础。

焊接领域的早期研究主要集中在材料焊接性和焊接冶金问题方面，焊接性和冶金问题研究使得很大范围的材料可以采用焊接方法实现高质量的连接，并能够提供足够好的接头性能，从而控制了焊接接头的完整性。虽然材料焊接性研究仍有一定的需求，特别是在先进材料的高质量连接方面，但近期研究还是主要投入到更深入地理解焊接过程的基本现象，包括焊接材料、焊接设备开发以及焊接过程的控制和自动化等方面。

John Norrish
Wollongong 大学

目　录

第1章　焊接方法简介

1.1　连接方法与焊接方法分类

对于很多不同种类的工程部件制造，焊接和连接技术的作用非常重要，这些不同种类的工程部件的种类从特大型结构（如船舶和桥梁）到非常复杂的结构（如飞机发动机），还包括精密结构（如微电子行业中应用的微小部件）。

1.1.1　连接方法

基本的连接方法可以分为以下几类：机械连接、胶接、钎焊、焊接。

可供选择的连接技术种类繁多，特别是近年来，连接技术取得了长足的进步，尤其是在胶接和焊接领域，一方面已有的焊接工艺得到了改进，同时还产生了新的连接方法。上述进步导致了大量新技术的激增，而新技术的激增有时使得具体工艺方法的选择变得困难，这在某些条件下又会限制新方法和新工艺的选择及应用。本书目的在于对近年来焊接方法和工艺领域内的最新进展给予客观的评价，以便于在给定应用条件下选择最合适的焊接方法。

本章将介绍工艺选择过程中需要考虑的一些基本概念，并重点论述传统焊接方法的一些特点。

1.1.2　焊接方法的分类

焊接目前采用几个不同方法的定义，例如定义为：两部分金属通过加热或加压或两者同时作用，以塑性或液态形式连接在一起的过程。焊接时可以使用或不使用填充金属，如果使用，填充金属应具有与母材相当的熔化温度[1]。

焊接也可以定义为：金属或非金属可以使用或不使用填充材料，通过将其在加压或不加压条件下加热到焊接温度，或者仅施加压力，最终实现局部的连接[2]。

目前已经有很多焊接方法，但为简化起见，这些方法可以划分为两大类：熔化焊接和压力焊接，如图1.1所示。图中列出了一些重要的焊接方法，更多的焊接方法及其名称列于附录1中[1]。

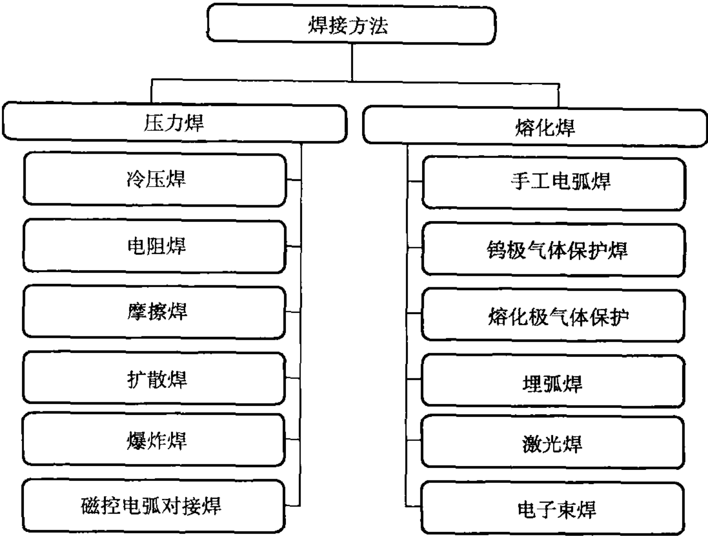


图 1.1 一些重要的焊接方法

1.2 传统的焊接方法

本节将对最常用的焊接方法，以及它们的应用范围及其局限性进行简要介绍，更先进的方法及其发展将在其他章节中给予较详尽的介绍。

在国际标准 ISO 4063[3] 中通过不同的数字和字符定义了不同的焊接方法，第一位数字表示其所属焊接方法的主要种类，第二和第三位分别表示不同的子类。焊接方法的主要种类以及一些子类的例子列于表 1.1 中。在章节 1.2.1 和 1.2.2 中，有些焊接方法的种类也在其名称后面的大括号 {} 中列出。

表 1.1 ISO 4063 标准中数字含义举例

主 类	次 类	子 类
{1} 弧焊	{12} 焊条电弧焊 {13} 熔化极气体保护焊 {15} 等离子弧焊	{111} 手工电弧焊 {131} 熔化极惰性气体保护焊 {141} 钨极惰性气体保护焊
{2} 电阻焊	{21} 电阻点焊 {22} “缝” 焊 {23} 凸焊	{222} 压平缝焊 {291} 高频电阻焊
{3} 气焊	{31} 氧燃料气焊	{311} 氧乙炔气焊

（续）

主 类	次 类	子 类
{4} 压焊	{42} 摩擦焊 {48} 冷压焊	{441} 爆炸焊
{5} 高能束焊接	{51} 电子束焊 {52} 激光焊	{511} 真空电子束焊 {521} 固体激光焊 {522} 气体激光焊
{7} 其他焊接方法	{71} 铝热焊 {75} 光辐射焊	{753} 红外辐射焊
{8} 切割	{81} 火焰切割 {82} 电弧切割 {83} 等离子弧切割 {84} 激光切割	{821} 空气弧切割
{9} 钎焊	{91} 硬钎焊 {94} 软钎焊	{912} 火焰钎焊 {944} 浸沾钎焊

1.2.1 压焊

1. 电阻焊 {2}

电阻焊过程中虽然会在被连接材料的界面处产生熔化现象，但其仍然被定义为压焊，电阻点焊 {21}、电阻缝焊 {22} 及电阻凸焊 {23} 都基于相同的原理实现焊接：需要连接的材料被夹持在两个电极之间，然后施加大电流，如图 1.2 所示，接触表面的电阻热会导致局部的加热和熔化。电阻焊过程中一般施加短时

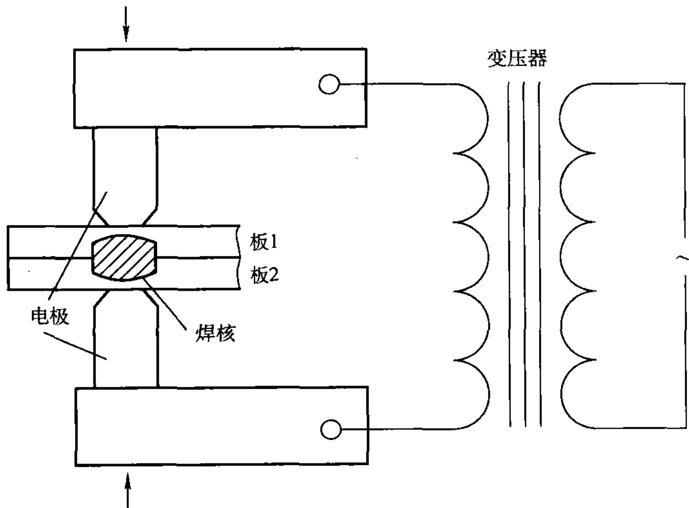


图 1.2 电阻焊系统

大电流（典型的为10000安培数量级），一般通电之前即施加压力并在电流撤销后仍保持片刻。

为确保获得稳定的焊接质量，通常需要精确控制电流峰值、电压和焊接时间，但即使这样，焊接质量也仍可能会因材料接触电阻的变化、电极磨损、磁路损失、电流通过已完成的焊点等原因出现变化。这些在焊接操作过程中不可预见的变化导致生产中比设计要求增加焊点数量，为可能出现的个别焊点质量低下提供某种意义的预防护。为改善这种状况，电阻焊过程的监测和控制得到了明显的发展，这些进展提高了电阻焊过程的应用效率，部分相关技术将在第10章中介绍。

基本的电阻焊方法的特点包括：

1）该方法需要的设备相对简单。

2）该方法容易实现自动化并且一般采用自动化操作。

3）一旦建立焊接参数，基本可以在一个相对较长的生产周期中使用并重复性生产。

电阻焊方法主要应用于汽车工业以及大型家电工业中钢板的连接。

2. 冷压焊｛48｝

如果对洁净的、装配界面良好的材料施加足够大的压力，并产生相应的塑性变形，材料表面层将被破坏，并在界面间形成金属键合，这样就形成了冷压焊接头[4]。冷压焊的主要特征是：

1）设备简单，成本低廉。

2）有效避免材料的热损伤。

3）最适宜于强度低（软）材料。

压力与材料变形可以通过滚压、预置凹凸槽施压、对接、拉拔及施加切应变等方法实现。一般情况下金属的延性越好就越容易实现焊接。

这一方法已经应用在电力工业中小直径铜、铝导线间的连接，通过对接或预置凹凸槽施压方法实现。滚压连接用于生产双金属板，如炊具中的铜/铝双金属板、铝/锌印刷板以及电子产品中的贵金属接触弹簧等。

3. 摩擦焊｛42｝

摩擦焊过程中，接触表面间的相对运动导致接头处高温，当表面材料温度升高并软化后，施加顶锻力并同时停止接触面间的相对运动，如图1.3所示。摩擦焊过程中材料可能被从接头处挤出并形成飞边。

这一过程根据提供能量的方法可以分为几种不同的操作模式：

（1）连续驱动　这种模式下相对运动是通过与能量源直接耦合获得的，加热过程中驱动相对运动的机构保持稳定的速度。

（2）储能式　相对运动是由飞轮储能释放实现的，加热过程中飞轮与驱动

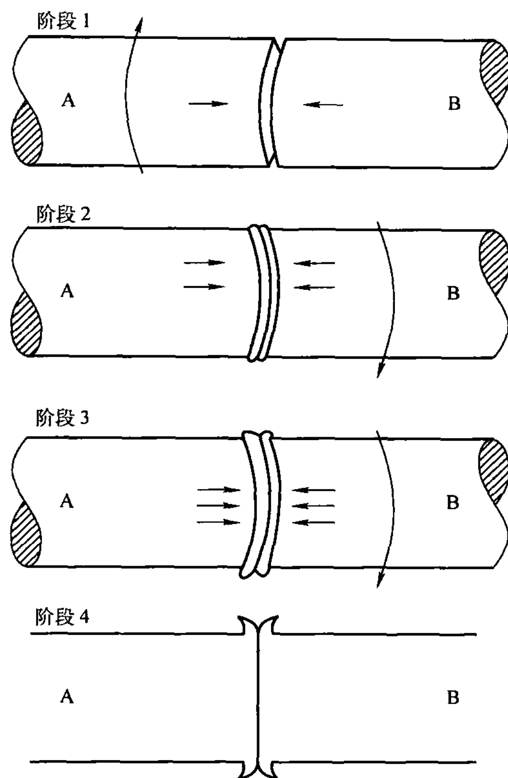


图1.3　摩擦焊接

阶段1：A固定，B旋转并向A移动并产生接触　阶段2：A固定，B旋转并施加压力，界面被加热
阶段3：A固定，施加顶锻力　阶段4：相对运动停止，焊接接头形成

机构间的连接被断开。

旋转运动是摩擦焊接中最常见的接触面相对运动，主要应用于相对角度关系要求不苛刻的两个回转体的焊接（如图1.4），如果需要两个被连接的部件间保持特定的相对角度关系，可以采用一定角度范围内往复旋转的方式实现焊接，而对于非回转体的焊接，可以通过在固定轨道上线性往复运动的方法实现。摩擦焊的特点包括：

1）一次性过程完成对接接头。

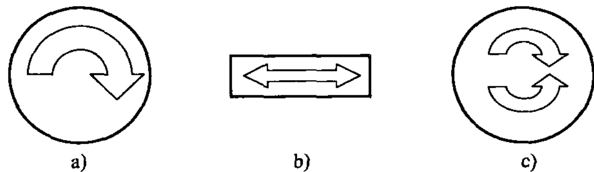


图1.4　摩擦焊种类

a）常规旋转摩擦焊　b）线性摩擦焊　c）角摆动摩擦焊

2）适用于异种材料的连接。

3）完成周期短。

4）特别适用于回转体。

5）可能需要价格昂贵的大型精密设备。

摩擦焊方法通常用于截面轴对称结构的焊接，特别是钢材，但也适用于异种材料接头例如铝与钢，甚至陶瓷与金属。该方法早期应用于汽车短轴的焊接，同时也应用于高质量飞机发动机部件的制造[5]、海洋工程中双相不锈钢管道的制造[6]及核设施部件的制造[7]。

摩擦焊近年来的研究工作包括金属与陶瓷的连接[8]、常规环境及水下的螺柱焊接以及将该方法应用于表面工程[9]。最近，线性摩擦焊被成功应用于钛合金的焊接，接头区域的面积为250mm^2，频率为25kHz，轴向压力为100MPa，往复运动的幅值为±2mm。

4. 扩散焊｛45｝

扩散连接过程中母材表面经过清理后在惰性气氛中被加热，对接头施加压力后，扩散现象伴随着局部塑性变形而发生，并使得表面间隙消失[11]，最终实现了焊接。扩散焊的特点包括：

1）适用于连接的材料范围很广。

2）一次性过程完成连接。

3）可以连接复杂截面。

4）需要真空或保护性气氛。

5）完成一个焊接周期可能需要较长的时间。

扩散焊接也可用于多处焊缝需要同时完成的复杂结构的连接。

5. 爆炸焊｛46｝

爆炸焊中界面变形所需要的力来自于爆炸能量的释放。在最常见的爆炸焊中，两块平板被连接在一起形成双金属板结构，爆炸产生能量的释放，驱动复板（置于上面的板）向基板（置于下面的板材）高速撞击，撞击面会产生局部塑性变形，而后塑性变形以类似于平行波的形式推进到全部撞击面，完成板材的连接，如图1.5所示。对于大

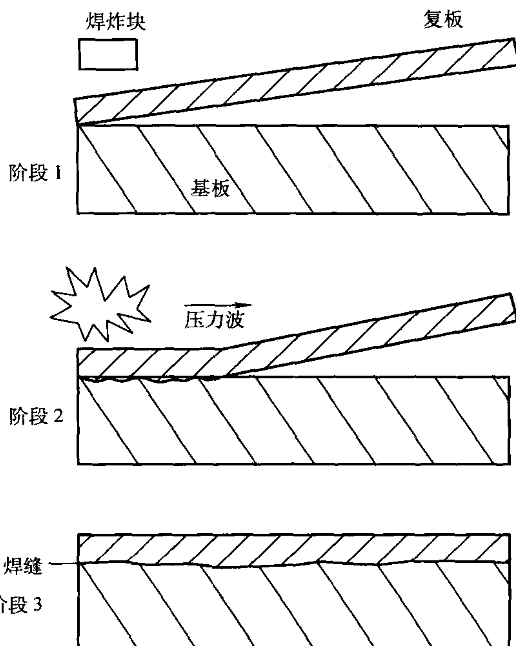


图1.5　爆炸焊

型工件，爆炸焊会伴随相当大的力，因此需特别加以关注，以确保焊接过程的安全操作。这一方法的特点包括：

1）一次性过程完成连接。

2）焊接时间短。

3）适于大表面积的连接。

4）适于不同厚度和材料的金属的连接。

5）大型工件焊接时需要精心的焊前准备。

6）安全性是一个重要问题。

爆炸焊也可用于换热器中管与板的焊接，或用于封堵多余管路或损坏管路的焊接。

6. 磁控旋弧焊｛185｝

在磁控旋弧焊中，电磁场驱动电弧在接头表面移动，如图1.6所示[12]，然后对接头施加压力完成焊接。虽然这种方法产生的接头与摩擦焊相似，但可以在更短的时间内完成焊接，并且也可避免被连接部件间的相互位置变动。该过程的特点包括：

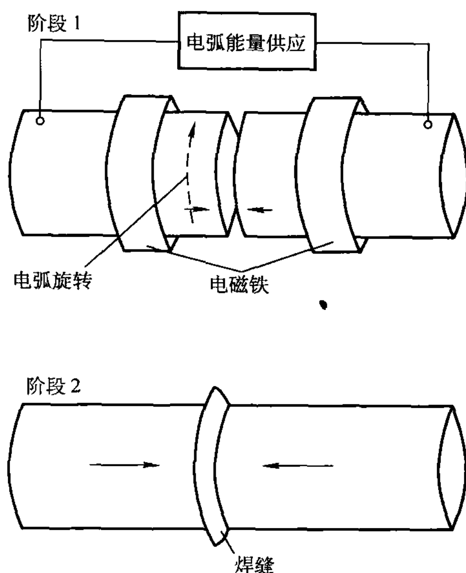


图1.6　磁控旋弧焊
阶段1：旋转电弧加热端面
阶段2：施加顶锻力

1）一次性过程完成连接。

2）适用于复杂截面的对接焊。

3）比摩擦焊所需的焊接周期短。

磁控旋弧焊已经广泛应用于汽车工业中制造轴类零件及碰撞吸能装置的管类零件，零件的直径范围在10～300mm间，管类零件的厚度范围在0.7～13mm间[13]。该方法还用于传输管线的连接，特别是小直径薄壁管的连接。

1.2.2　熔焊

1. 钨极气体保护焊｛141｝

在钨极气体保护焊（在大部分欧洲国家也被称为钨极惰性气体保护焊，在德国称为 wolfram inert gas，并且在有些国家也按照其原始商标名称为氩弧焊，氦弧焊）过程中，热量是由电弧产生的，电弧稳定地维持于工件和一个不熔化的钨电极间，用于熔化连接区的金属。电弧燃烧于惰性气体的氛围内，惰性气体主要用于保护熔池和电极免于空气污染，如图1.7所示。钨极气体保护焊的特点包括：

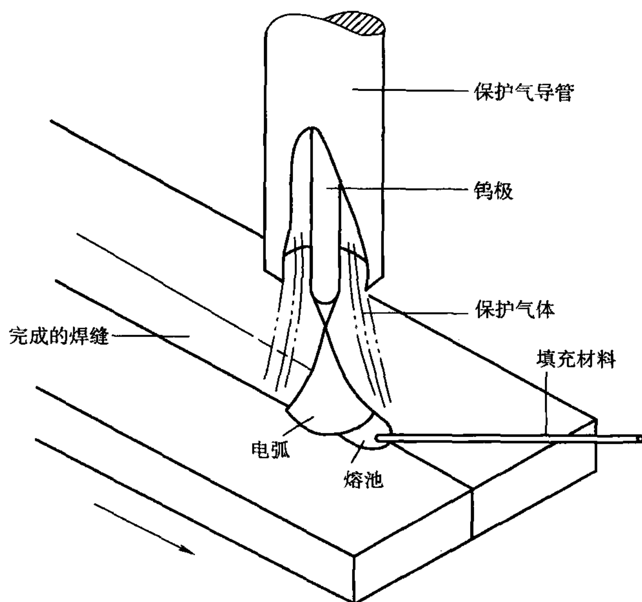


图 1.7 钨极气体保护焊方法

1） 在化学惰性气氛中进行。
2） 电弧能量密度相对较高。
3） 过程可控性好。
4） 接头质量通常较高。
5） 熔敷速度和接头完成的速度较低。

钨极气体保护焊可以用于连接很广范围的工程材料，包括不锈钢、铝合金、活性金属如钛等，该方法的上述特点使其在航空航天、核反应堆修复、能源动力工程等领域得以重用；此外，钨极气体保护焊在其他如化工反应容器制造、食品加工及酿造设备制造等方面也有非常广泛的应用。

2. 手工电弧焊 {111}

手工电弧焊［也即在欧洲与澳大利亚为人熟知的电弧焊］在很多年来一直是钢结构的一种最通用的制造方法。这一过程中以电弧作为热源，热源处于焊条药皮分解所释放出的气体形成的保护气氛中，同时提供保护的还有药皮中矿物质熔化所形成的焊渣，如图 1.8 所示。焊渣有时具有化学活性，辅助控制熔池中杂质或溶解气体的含量。除了加热并熔化母材外，电弧还起到熔化焊条芯部的作用，并由此为接头提供填充材料。焊条药皮也可以作为合金化元素和辅助填充材

料的来源。焊条药皮和熔化的金属电极的化学成分还可以进行专门的设计从而堆焊耐磨或耐腐蚀表面保护层。

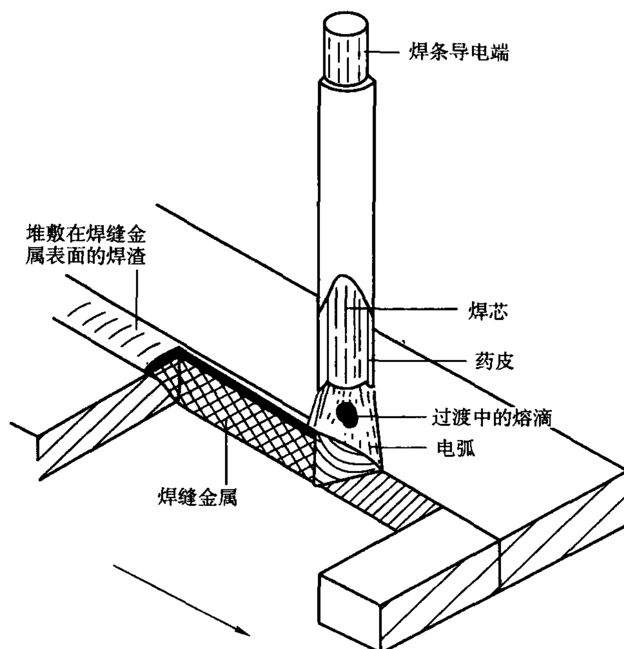


图1.8　手工电弧焊

手工电弧焊的主要特征是：

1）设备需求简单；

2）有大量的焊条材料可供选择。

3）属于便携式方法。

4）操作效率低。

5）劳动强度大。

由于以上原因，手工电弧焊传统上一直被用于钢材料结构、造船、重型机械工程以及小批量产品的生产及维护。

3. 埋弧焊｛12｝

埋弧焊是一个电极熔化并产生电弧的焊接过程，其间电弧受到熔化的焊渣保护，电弧气氛是由特定的焊渣成分分解产生的，如图1.9所示。填充金属是一个连续进给的丝，当采用大电流时（例如1000安培）即使采用直径相对较小的焊丝也可获得非常高的熔化速度和填充速度。

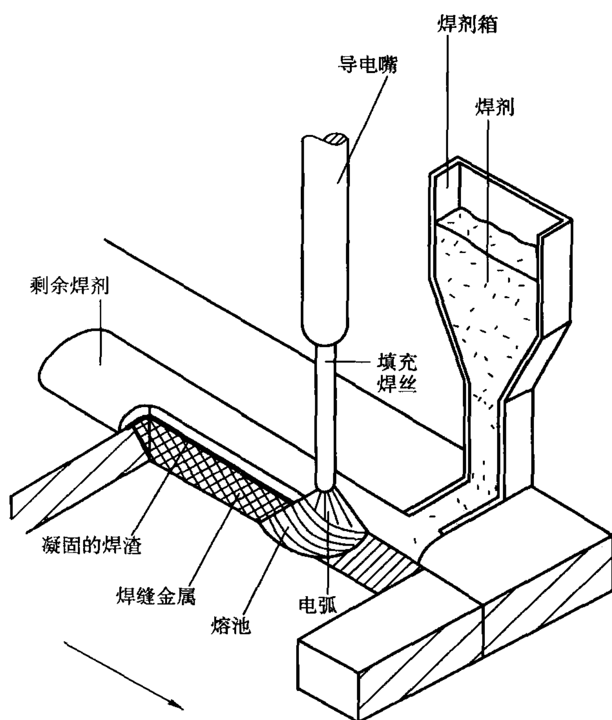


图 1.9 埋弧焊

埋弧焊的主要特点是：

1）高熔敷速度及填充速度。

2）自动化操作。

3）无可见弧光辐射。

4）灵活的焊剂/焊丝匹配。

5）很难用于全位置焊接。

6）通常用于焊接6mm 以上的厚度材料。

埋弧焊主要用于普通碳钢和低合金钢的厚大结构焊接，已经在电站设备、核容器、重型结构、海洋工程和造船等行业得到应用。埋弧焊还可用于具有简单几何形状和较薄截面结构的高速焊接，例如制造存贮液化石油气的压力容器。和手工电弧焊一样，选用适当的焊剂/焊丝组合，埋弧焊也可以用于表面工程。

4. 熔化极气体保护焊 {13}

在熔化极气体保护焊中（在欧洲也称为熔化极惰性气体保护焊或熔化极活性气体保护焊，有些时候也称为半自动焊接或二氧化碳焊接，但后两种称呼使用并不广泛），利用电弧产生的热量熔化接头区域。在连续进给的填充焊丝端部和

被焊工件之间，电弧的全部区域都受惰性气体的保护，操作过程的原理如图1.10所示。

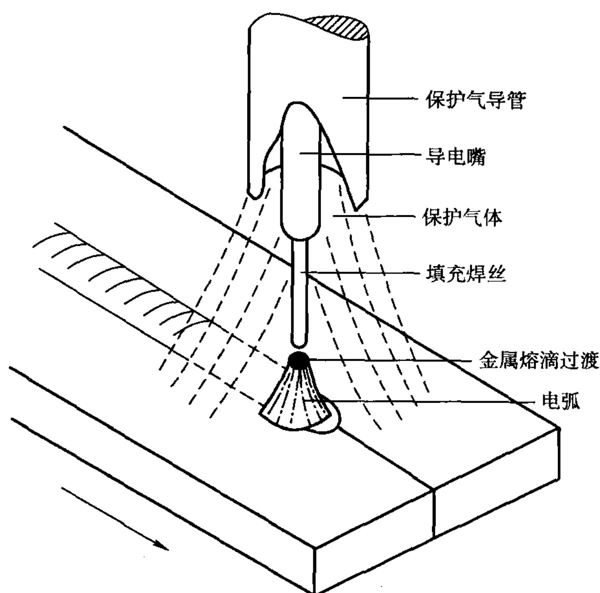


图1.10　熔化极气体保护焊或熔化极惰性气体保护焊

熔化极气体保护焊的一些重要特征归纳如下：

1）低焊接热输入（相对于手工电弧焊和埋弧焊）。

2）连续操作过程。

3）高熔敷速率。

4）没有严重的焊渣，降低了焊后清理的工作量。

5）低氢焊接过程降低了冷裂纹的风险。

熔化极气体保护焊还可以在小电流条件下用于薄壁结构焊接或全位置焊接。当然，这取决于所选择的操作模式。

熔化极气体保护焊普遍用于连接厚度范围在0.5～2.0mm间的低碳钢板材，主要应用领域包括：汽车车身制造、排气系统、贮罐、铁架、送热管线和通风管道等。该方法还可用于稍厚些的低碳钢和低合金钢的全位置焊接，主要应用领域包括：油气管线、海洋工程结构、运土装备。电流进一步加大时，熔化极气体保护焊可以获得更高的熔敷速率，可以用于平焊、横焊和立焊等多种位置的焊接，并连接较大范围的材料种类，其工程应用包括：运土装备、钢结构（I形梁的制造）、表面堆焊镍合金或铬合金、铝合金低温容器及军用车辆的制造等。

5. 等离子弧焊 {15}

在等离子弧焊中，受拘束的电弧产生的热量用于熔化接头区域，产生电弧的一端是非熔化电极的端部，另一端是工件或者拘束喷嘴，如图 1. 11 所示。随着操作模式和具体应用的不同，用于保护和切割的气体种类很多。在常见的转移弧模式下，电弧维持于电极和工件间，一般情况下电极接负极，工件接电源正极。在这种模式下，能实现高能量密度，等离子弧方法就可以应用于焊接和切割。

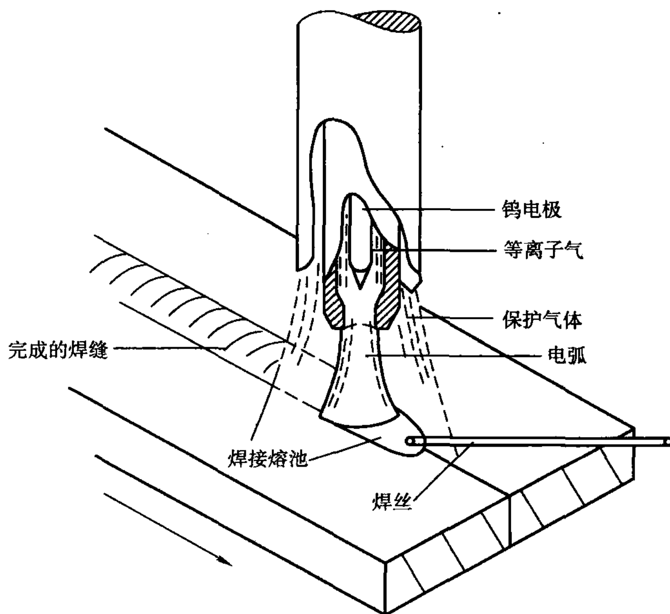


图 1. 11 等离子弧焊

等离子弧焊过程的特点决定于所选操作模式和电流，对此将在第五章和第七章中予以详细描述，但归纳起来，等离子弧焊过程具有如下特征：

1）在很好的小电流下，电弧的稳定性好。

2）相对于钨极惰性气体保护焊具有更好的指向性。

3）相对于钨极惰性气体保护焊具有更高的熔化效率。

4）具有形成小孔形焊接的可能性。

等离子弧焊接的这些特点使其适用于如下应用范围：连接非常薄的材料，电子部件和传感器的封装，高速焊接板带或管道的纵缝。

6. 电子束焊 {51}

一束电子可以通过高电压加速并为焊接提供高能热源（详见第 8 章），电子束的能量密度很高（$10^{10} \sim 10^{12} W/m^2$）。小孔型焊接是电子束最常见的焊接模式。当高速电子与大气中的空气分子发生碰撞时，电子束能量就会分散，人们通过在

真空室中完成焊接解决这一问题。电子束焊接的特点包括：

1）非常高的能量密度。

2）小尺寸热源。

3）大深宽比的焊缝。

4）通常需要真空。

5）设备昂贵。

传统上电子束焊接用于航空发动机部件及各种仪器制造业。对于很多材料而言，当需要很高的精度和非常大的熔深时，也可以选用电子束焊接方法。

7. 激光焊｛52｝

激光也可以作为熔化焊接中的一种可选择的热源（详见第七章）。激光聚焦后的能量密度可以达到$10^{10} \sim 10^{12} W/m^2$，激光焊时通常采用小孔模式，激光焊的显著特点是：

1）低功率时尺寸非常小的热源。

2）高功率时大熔深。

3）变形和热损伤较小。

4）非真空技术。

5）设备昂贵。

激光焊的这些特点使其适用于电子部件的微连接，但该方法也被用于大尺寸钢铁结构的焊接，如用于制造汽车部件和精密机床工具及其部件。

1.3　本章小结

可供选择的焊接方法种类繁多，而给定条件下各种方法的适用性决定于每种方法自身固有的特点。某些特定方法，由于在自动化和过程控制方面的进展及其先进性，也可以推广应用到大部分其他方法中，这些将在2～11章中详细叙述。

第2章　先进工艺发展趋势

焊接技术发展的主要推动力是在制造业中提高连接过程综合性价比的需求，当然，其他因素也可能影响到新工艺技术的需求。在很多国家，焊接接头及环境的安全性、熟练技术人员和操作工人的潜在需求，已经引起人们的重视，这也成为了焊接研究中的一个主要方向。

第一章中介绍的很多传统的焊接技术，被公认为高消耗和危险的方法，但采用后续章节中介绍的先进工艺方法，却可以显著改善传统焊接方法的成本和安全性。下面将简要介绍一些重大工艺的技术产生和发展背景，以及先进工艺方法在焊接生产中的应用现状。

2.1　焊接技术的性价比

生产一个焊接接头的成本是人工成本、材料成本、能源成本以及固定资产折旧成本的总和。西方经济体系中，焊接生产总成本主要是由人工成本决定的，对于很多传统的焊接方法，人工成本一般占总成本的70%到80%。这种成本比例列于图2.1中。

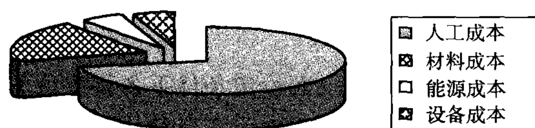


图2.1　焊接成本

传统上，人们普遍认为焊接生产的性价比基本上由熔敷速度决定，因此开发了很多提高熔敷速度的新方法和工艺，图2.2[14]列出了一些常见熔化极焊接方法的熔敷速度对比。

就常规而言，金属熔敷速度越高，完成焊接的过程越短，相应地人工成本就越低，在后续章节中，将讨论高熔敷速度焊接方法的一些最新研究进展。但在某些条件下，单纯考虑熔敷速度也会对焊接过程性价比产生误导，比如说，当焊接接头的质量要求非常严格时或者接头需要较高的修复再制造工作时。另一方面，对于一些接头完成速度很高的高度自动化焊接方法，如爆炸焊、激光焊等，采用熔敷速度这一指标评价焊接方法的性价比也不恰当。

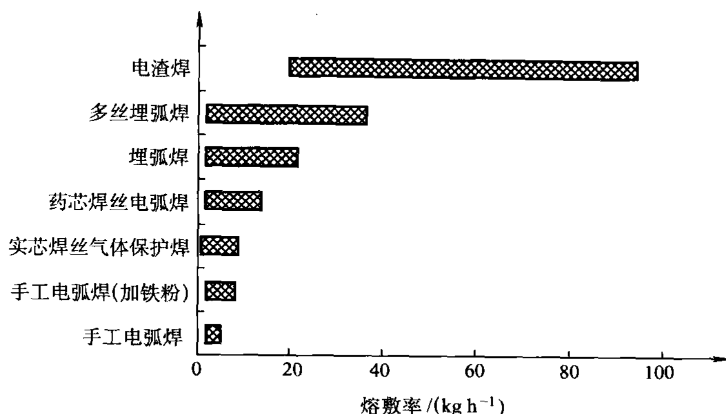


图 2.2 一系列熔化极焊接方法熔敷率的对比

因此，为全面评价焊接方法的性价比，还有如下一些其他因素必须予以考虑：

1）接头质量控制。

2）接头设计。

3）操作效率。

4）设备及焊接材料成本。

1. 焊接接头质量控制

传统焊接工艺过程是由大量的相互影响的操作参数决定的，焊接接头的质量主要由这些工艺参数的优化、焊前准备及焊后处理的精心控制所决定。为了保证接头质量的可重复性，经常通过已有的“规则”组合与焊接实验确定每种接头所适用的焊接工艺，以工艺规范的方式固定下来，并应用到后续同类接头的焊接中[15]。对于质量要求高的焊接接头，焊接工艺规范和操作者均须得到权威认证机构的审核与正式认证。工艺规范的这种产生和认证过程既耗费大量的时间，在经济方面也成本高昂，因此，对于特定的焊接产品，一旦工艺规范已经确定，除非新工艺所节约的成本超出工艺规范再制订和认证的消耗，应尽量避免采用新工艺及重新制订规范导致的成本增加。

上述接头质量技术的成功实现还取决于生产过程中确保预先制订的工艺规范能够得到有效执行。这意味着，现场监测所用设备的状况能确保操作工人对工艺规范的执行。更不幸的是，事情还不仅如此，经常因需要焊后检测或对焊缝进行修复而产生额外成本。能够确保焊接过程得到更有效控制的先进技术的发展，无疑将对焊接生产成本产生显著影响，使用更多的冗余度大的焊接耗材、更多重复

性好的设备和工艺、自动化技术、在线监测和实时控制系统，都会提高焊接过程的可控制程度。另外，研究者重燃了对焊接过程模拟和参数预测技术的兴趣，并据此针对特定的焊接条件建立优化的焊接工艺。

2. 接头设计

对接头过于严苛的要求，对焊接成本的增加有显著影响：以简单的角接头为例，焊脚长度增加 1mm 将使焊接成本增加 45%，如图 2.3 所示。

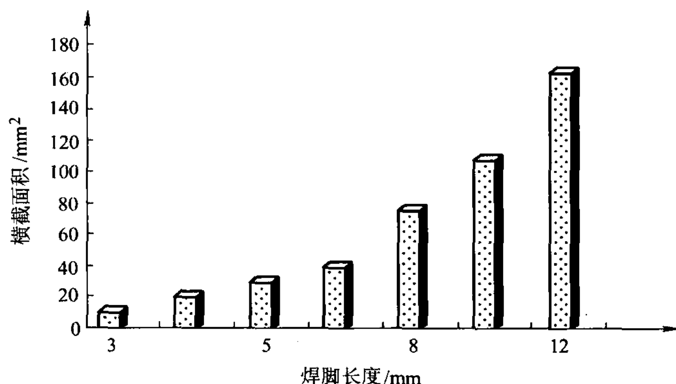


图 2.3 接头设计（焊脚长度）对所需焊材的影响

选择了一种特定的接头设计，一般就自动地决定与之相适应的最高性价比的焊接方法，例如，接头设计导致的可操作性差或复杂的接头轮廓，会限制焊接方法的选择。对于设计者而言，了解各种焊接方法的局限性并在接头设计中尽量避免是十分重要的。反过来，选择了一种合适的焊接方法也可能会降低接头准备时间和接头完成时间。普遍而言，接头完成时间与所需要的填充金属量有关，这可以在图 2.4 中看出来。图中可以发现，接头所需填充金属的量受接头形式的影响非常大。例如，采用电子束方法焊接 20mm 厚的对接钢板，其完成时间明显少于采用等效的气体保护焊方法。因为在气体保护焊方法中，为了确保焊接过程的可操作性，对这样的钢板必须开 50°～60°范围的坡口。因此，熔敷金属需求量低，焊前接头准备时间短的焊接方法似乎将具有更高的性价比。

3. 操作效率

焊接过程的操作效率被表示为“操作系数”（操作系数有时也被称为效率系数，但这又经常导致其与描述焊接设备输出效率的功率系数混淆），其本质是焊接时间与非焊接时间的比值，并以百分数的方式表示。对于手工电弧焊方法，操作系数仅为 15% 到 20% 之间并不罕见，而气体保护焊方法的操作系数一般却能达到 30% 到 50%[16,17]。提高操作系数对于降低焊接成本具有重要的作用，因为其直接影响人工成本。操作系数对人工成本的影响列于图 2.5 中。

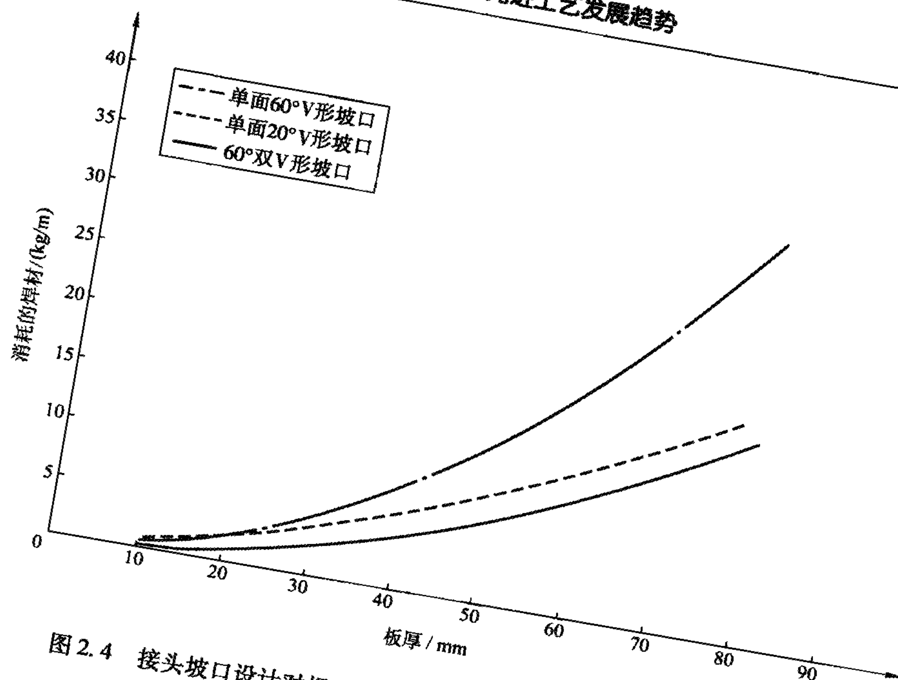


图 2.4　接头坡口设计对焊材消耗量的影响（所有接头均为对接接头）

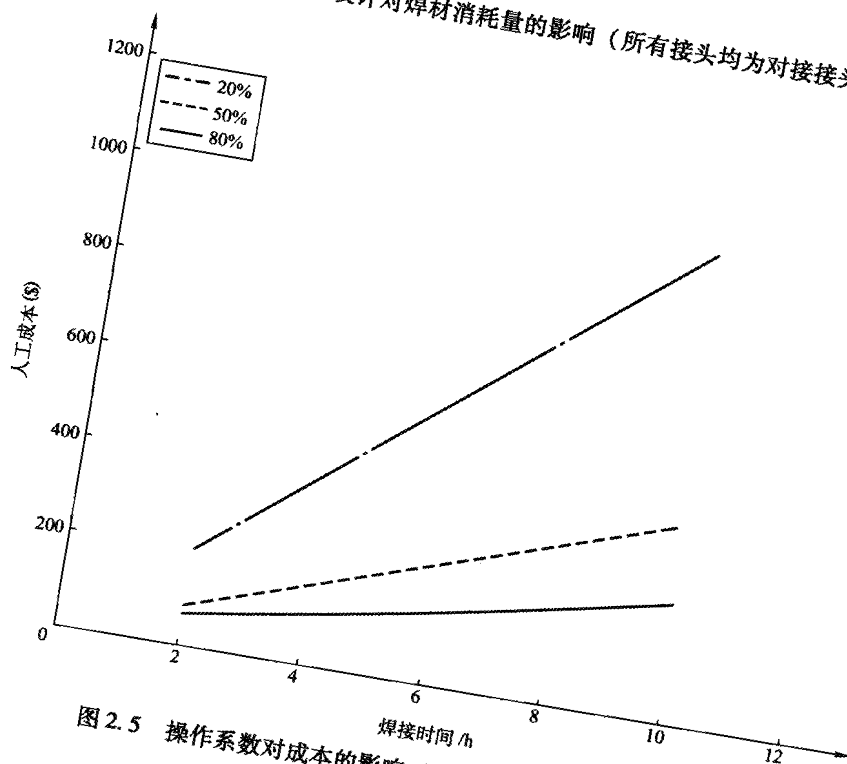


图 2.5　操作系数对成本的影响（设定人工成本为 50 $/h）

4. 焊后处理

焊接过程可能导致一些缺欠，这些缺欠需要焊后处理矫正。这类缺欠中最常见的是变形和残余应力问题。当然，焊接冶金缺欠如晶粒长大、氢致裂纹等也必须予以考虑。缺欠还包括表面涂层破坏、焊接飞溅等。焊后复杂的机械或热处理操作将不可避免地增加制造成本，因此工程界迫切需要开发能够降低相应焊后处理的方法或工艺。

缺陷的可能风险导致了昂贵的焊后无损检测的需求。虽然近年来由实践中总结出的一些规则允许根据服役条件判断不同类型的缺陷是否允许存在，但当需要开展焊后修复时，生产工期将被延误，而且一般对应着很高的劳动强度，无疑导致制造成本增加。因此，对潜在质量问题的预先评估不但是必要的，而且也能够节约成本。

2.2 安全与环境因素

已经发现的一些可能会由焊接导致的危害列于表2.1中[18]。

表2.1 焊接安全方面危害的典型例证

危　害	焊接方法
电冲击	电弧焊，电阻焊，电子束焊
辐射，弧光，红外线，紫外线	焊条电弧焊，TIG焊，MIG焊，等离子弧焊，激光焊
X射线辐射	电子束焊
颗粒性烟尘	电弧焊及高能束焊方法
有毒气体（如臭氧等）	产生电弧的焊接方法
高压及导致窒息的气体	大部分焊接及切割过程
可燃或爆炸性气体	氧作为燃料的焊接过程，等离子切割
噪声	摩擦焊，等离子弧焊

焊工一般受到专用保护服、护目镜及绝缘等措施的防护，但对焊接操作区附近人员的防护可能还需要增加其他防护措施。这些措施本身可能会价格高昂，也可能对生产过程的整体性价比也会有重要影响。因此，开发改善焊工工作条件或避免焊工进行高危操作的焊接方法或工艺具有较强的需求。

2.3 技能与培训需求

很多传统的焊接方法需要焊工具有高水平的操作技能和灵巧性，而这一般需要经过专门而昂贵的培训过程，特别是需要满足前面提到的专门焊接规范时。较

新的焊接方法能够在一定程度上降低对整体操作技能的要求，但不幸的是，有时这又被更复杂的焊接设备所抵消，而且，建立相对应的焊接参数所需耗费的时间也会部分抵消操作便利的有利影响。开发相应设备简化操作方法的研究将在后文介绍，但即使是应用最先进的设备和焊接方法，适当的操作水平和相应的培训工作也是必不可少的。培训增加的成本经常会在短时间内被提高了的生产率和产品质量所弥补。

2.4 发展方向

如果能够在下述方面取得进展，焊接方法的先进性会得到更高的评价：

1）提高熔敷速度。

2）减少生产周期。

3）提高过程控制水平。

4）减少返修率。

5）减少接头准备时间。

6）避免焊工在有害区域工作。

7）减小焊缝尺寸。

8）减少焊后操作。

9）改进操作系数。

10）降低潜在的安全风险。

11）简化设备设置。

目前开发出的很多先进焊接方法或工艺已经能够部分或全部满足上述需求，后续章节中将对此进行详细介绍，本章其余内容将继续介绍这些技术目前的应用趋势。

2.5 先进焊接技术的应用趋势

在国际范围内，焊接技术应用的几个重要趋势是：

1）熔化极弧焊方法中的工艺变化。

2）自动化技术应用范围的增加。

3）对焊接新方法兴趣的增加（如激光焊）。

4）先进材料制造集成技术的需求。

2.5.1 焊接材料的发展

在很多工业化国家，一个非常显著的现象是：以传统手工电弧焊的成本，使

用气体保护焊方法和药芯焊丝自保护焊方法。英国、日本、美国生产和消耗焊接材料的曲线示于图 2.6 中[19]。最新数据[20]表明，工业化国家中手工电弧焊焊条消耗量将稳定在 10% ~20% 之间，相应地，发展中国家焊条消耗的比例估计要略高些。埋弧焊焊材的用量已经稳定在占焊接材料总量的 13% 左右[21]。

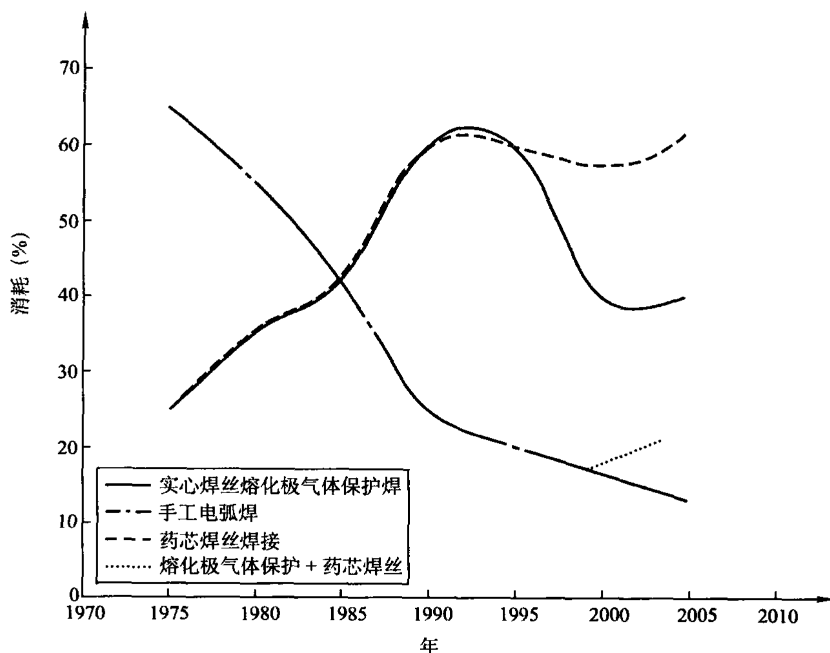


图 2.6 焊丝材料消耗的趋势：平均数据，可以观察到在 1980 年代在某些国家（如日本）药芯焊丝的使用量显著增加，这种增加与实心焊丝在熔化极气体保护焊和手工电弧焊中应用量的减少相对应。

这一趋势表明了建立焊接操作全过程成本评估的重要性：药芯焊丝对于制造商而言无疑价格高昂，很多时候比气体保护焊所用的实芯焊丝贵四倍以上。然而，采用药芯焊丝可以提高焊缝熔敷速度，获得更高的操作系数，允许更广泛的参数范围并提高接头质量，因此虽然焊接材料成本增加，但总体焊接制造成本反而降低。当然，总体焊接成本也依赖于具体应用状况：例如，对于简单的 6mm 厚钢板的平焊或立焊，采用常规气体保护焊方法配以实芯焊丝可以获得最低的整体成本；然而，对于 20mm 厚钢板平焊对接接头，需要多道焊完成，药芯焊丝自保护焊具有最高的性价比[22]。

2.5.2 焊接自动化技术的发展

使用“单触发”式焊接方法，如电阻点焊和气体保护连续焊接方法能够促

进自动化技术的应用，机器人技术的应用趋势已经得到了广泛的报道[23]。

很多机器人电阻焊技术应用于汽车工业中，但机器人气体保护焊或钨极气体保护焊系统的应用则分散得多。另一个很明显的迹象是机器人在日本的应用已经超过了其在西欧的应用，而且其应用比例也比美国高。在焊接过程中不采用机器人，但采用相对简单的机械化设备在目前的报道中虽然不多见，但在激光焊、电子束焊等焊接新方法中，一些自动化部件是焊接系统中的重要组成部分。简单而低成本的机械化被认为是一种高性价比的自动化，特别是对于气体保护焊和药芯焊丝保护焊等方法，其应用有望进一步提高。最近，计算机数字控制（CNC）的模块式自动化系统被引入到焊接技术中，这些模块不但能够执行许多与焊接机器人相关的功能，而且还提供了更高的灵活性。

在柔性制造系统中，集成具有良好控制功能的焊接系统在技术上是可行的，在机器人或计算机控制的焊接单元等设备（如在线记录、部件自动识别等）的帮助下，可以获得在线质量保障、设备故障报告及生产数据等相应信息。这种类型的集成制造系统的设备投资成本无疑很高，但经济受益必须在整体制造效率的提高和最终产品成本核算的基础上评估。

2.5.3 焊接新方法的发展

近年来，激光焊接、磁控电弧焊接、扩散焊接等焊接新方法的应用逐渐增加。这些方法的应用在过去受到限制，但随着自动化技术的优势逐步得到承认，新材料的适用也对接头完整性提出更高的要求，人们普遍认为这些新方法的应用将进一步增加。

正如第一章中所介绍的，搅拌摩擦焊是焊接技术发展中的一个显著进步，并且不断在延性材料高速无变形焊接的需求中寻找新的应用方向，这一方法的不断发展似乎将进一步拓展其应用领域。

1988年时，世界范围内工业激光器的销售量约为3000台，自此以后，激光器的销售以每年10%的速度增长[24]。人们普遍预期这一增长速度将继续保持下去，其中二氧化碳激光器的增长速度约为每年13%，而Nd：YAG激光器的增长速度约为每年7%，YAG激光器的增长将以高功率设备（3~4kW）为主。激光器的增长中焊接应用的贡献约为20%。

最近焊接工作者投入了相当大的努力研究复合焊接方法（激光与气体保护焊相复合），这一方法已应用于造船和汽车工业中。目前还可以获得更高效的半导体激光和光纤激光，其输出功率可以达到3~20kW，大部分相关研究都集中于将这些先进设备应用于焊接或表面工程领域。

研究者近期还推出了磁脉冲焊接等新方法，并且已经在汽车工业的某些方面得到应用。通过设备、焊接材料、工艺控制等方面的技术进步，上述新方法的适

用范围得到了提高。有关新方法设备、焊接材料和工艺控制等方面的技术进步将在后续章节中讨论。

2.5.4 先进材料

由于结构体的使用条件变得更加严格，同时，在很多情况下，经济和环境压力迫使采用更高比强度的材料，应用更加先进的材料的需求不断增加。这些趋势在很多不同的领域中均有明显的体现，如：航空结构、海洋工程结构、微电路制造。先进材料的开发包括热-机械综合处理的具有更高屈服强度的低合金钢、纤维增强的复合材料（铝基）、高分子材料、混凝土类材料及陶瓷等。这些材料的应用主要取决于建立两个部件间可靠接头的难易程度。两个部件可以是同种材料，也可以是不同种材料，例如金属和陶瓷。连接这些先进材料的方法仍在开发中，不过，已经建立了采用常规电弧焊接技术连接高屈服强度钢材的焊接规范，采用固相连接方法焊接金属和陶瓷也取得了令人鼓舞的成果。

2.6 本章小结

焊接技术进步的需求是在经济和社会等多方面因素影响下形成的，这显著地促进了高效材料和设备的开发以及自动化技术的应用，一个明显的趋势是在传统焊接过程中使用更先进的控制和监测技术。

焊接新方法和先进材料技术的引入，提高了焊接技术的水平，同时也提出了新的挑战。

一些最重要的焊接方法所取得的进步也将在各节中举例介绍。

第3章　焊接电源新技术

3.1　引言

焊接电源设计上的改进，特别是电子控制的引入，使电弧焊中的很多进展成为可能。下面将对弧焊电源的基本要求进行研究，对传统和先进电源的设计原理以及它们的优点和局限性进行介绍。

3.2　电源的基本要求

对弧焊电源有三项基本要求：

1）为焊接过程提供合适的输出电流和电压特性。

2）输出可以调节以适合特定应用。

3）控制输出水平和顺序以满足焊接过程和应用的要求。

这些要求在图3.1中予以说明。

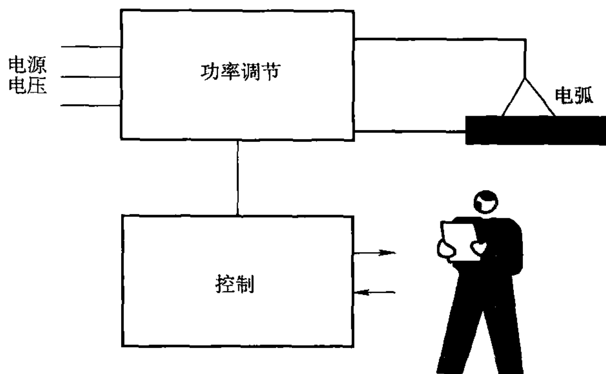


图3.1　焊接电源的功能要求

对于大多数电弧焊接过程，为了产生合适的输出，必须将正常电源的电力供应从高电压-低电流转变为更安全的低电压，并辅以相对较大的电流。这个功能可以通过传统变压器来实现，如果要求直流，可以通过输出端加整流器解决。整

流器的添加带来一个附加的好处，即可以使用三相电源[⊖]，使得电源上的载荷更均匀，每条线路的电流基本相等。此外，电源设计必须满足如下要求：

1）与规定的规范和标准相一致。

2）安装和操作安全。

3）提供满意的操作界面/控制。

4）必要时提供自动化系统界面。

3.3 传统电源设计

多年来传统电源使用电磁控制系统来调节输出功率；一些较常见的设计使用如下控制技术：

1）抽头变压器。

2）动铁心控制。

3）可调电感。

4）磁放大器。

3.3.1 抽头变压器

在焊接变压器的一次绕组中设置抽头，可以改变变压器的匝数比，从而调节输出。在大多数基于变压器的设计中，设置抽头是为了调节并得到一定的输入电压范围，但当这个技术是主要的控制方法时，需提供更多的抽头，并通过一个开关来选择，如图3.2所示。这种控制方法简单、鲁棒性强、成本低，但它只提供分极输出，并且，除非提供大量开关，否则输出电压分级就会比较粗糙。这种系统不能对输出进行遥控或连续调节，但常用于低成本和低负载的气体保护焊电源设备中。

3.3.2 动铁心控制变压器

另一种改变变压器输出的技术是通过分路器改变漏磁通，如图3.3所示。通过控制分路器的位置，就会改变一次、二次绕组之间耦合的磁通量，从而改变输出（输出随漏磁通的增大而减小）。这种控制方法可以连续调节输出，分路器的运动可通过电动机驱动实现遥控。但是这种方法成本较高，存在机械磨损，输出调节缓慢。这种控制方法目前主要用于小型的低成本手工电弧焊电源。

⊖ 尽管可以用‘斯柯特接线法’从三相电源中获得单相输出，但这会使负载不平衡。虽然可以使用具有三相输入和三个单相输出的多站变压器，但三相输入的负载取决于所使用的电弧数量和相应的输出电流。

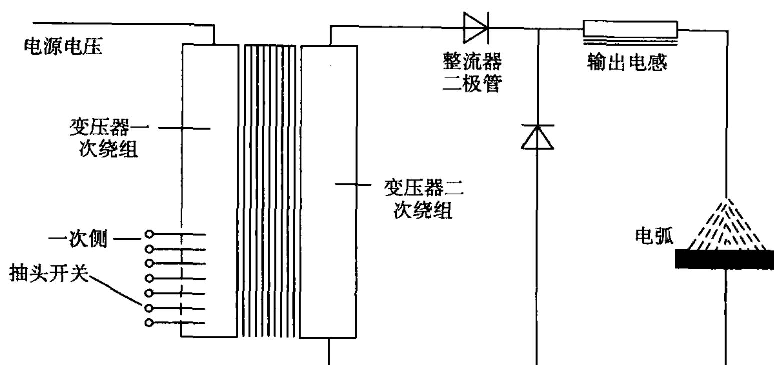


图3.2　抽头变压器-整流器

注意，为了清晰，只画出一相电路（大多数工业变压器都是三相）。

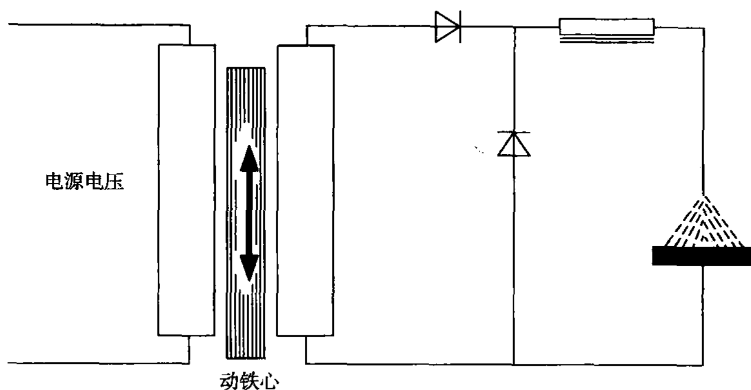


图3.3　动铁心控制变压器

3.3.3　可调电感式变压器

变压器的交流输出电路中可以连接一个可调的或抽头式的电感来调节电弧电流，如图3.4所示。尽管这种设计可以获得连续的电流调节，但通常不能实现遥控，而且大电流电感器体积庞大，价格较高。电感在交流电流和电压波形之间可引起不超过90°的相移是这种设计的一个可能优点。这将改善电弧再引燃特性（对于90°相移，当电流过零时，电压达最大值）。这种设计已经用于手工电弧焊和钨极氩弧焊电源中。

3.3.4　磁放大器

磁放大器或饱和电抗器控制如图3.5所示。一个通可调直流电的绕组缠在一

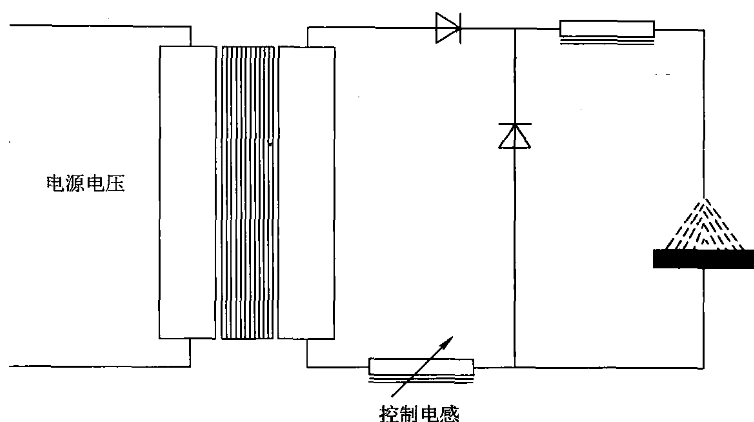


图 3.4　可调电感控制

个磁心上，该磁心上另一个绕组与变压器的交流输出相连。当控制绕组中的直流电流增大时，磁心中磁通量的平均值就会增加，趋向于磁饱和，因而限制了磁场变化，减小交流输出。这种技术允许输出连续调节、遥控和在一定程度上的输出波形调节。但磁放大器类系统的响应速度较低，直流控制电流可能会相当高（如 10A），饱和电抗器体积庞大、价格昂贵。尽管为了获得一定的远程控制功能，它也用在一些熔化极气体保护焊设备中，但磁放大器控制在一般情况下均用于钨极气体保护焊电源。

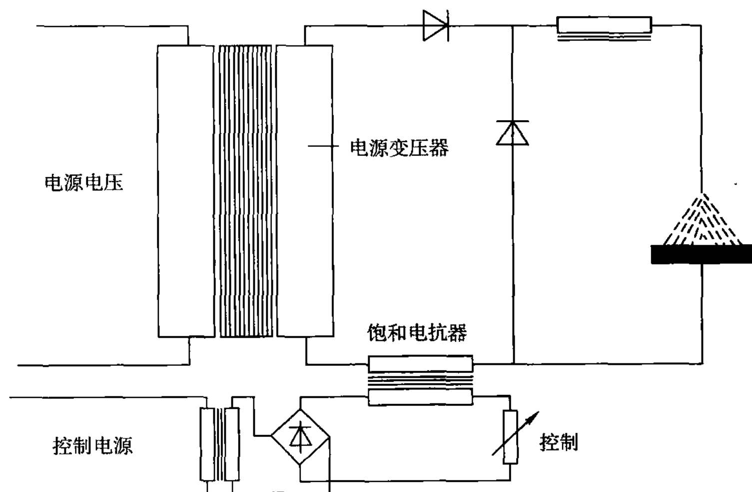


图 3.5　磁放大器控制

3.3.5 传统电源的静、动态特性控制

电源的动态（如电流变化速度、电流和电压之间的瞬时关系）及静态特性（平均输出电流和电压之间的关系）对于焊接过程的性能具有重要影响。对于传统电源，在钨极气体保护焊时为了获得最佳的引弧特性和电流稳定性一般采用恒流静特性，而对熔化极气体保护焊则采用恒压特性，以便获得自调节能力[25]㊀。这些特性一般在设计阶段就确定了，不能由使用者改变[26]。

动特性可以进行电调节，在熔化极气体保护焊中，一般在电源输出侧使用直流电感控制短路过渡的短路电流上升速度。较老式的熔化极气体保护焊设备采用连续可调电感，但目前很多设备制造商通过使用简单低成本的抽头电感器限制了调节范围。对用户而言，有限的动特性调节范围，在简化了设备操作的同时，也能够为很多应用提供足够的控制功能。但它也确实限制了对过程特性进行重要改进的可能性。

3.4 电子控制电源系统

大功率半导体的应用导致了各种电子电源的设计和发展[27]，这些电源可以进行如下分类。

1）晶闸管相控。

2）晶体管串联调节器。

3）二次侧开关晶体管电源。

4）一次侧整流-逆变器。

5）混合型设计。

3.4.1 晶闸管相控

晶闸管整流器（SCRs）可以看作为开关控制的二极管。当信号加在门极上时，它仅能单向导通。在正常条件下，只有当正向电流降为零时，它才能被关断。它可以用在直流电源的二次侧回路中代替常规二极管。输出电压的调节通过改变正常导通开始时刻与门极信号之间的延迟时间（图3.6）来实现。如果电压幅值一定，为获得低电压输出，要求有较长的引燃延迟，输出波形的脉动就比较严重。通过使用三相SCR（晶闸管整流器）桥，或大输出电感，或相间电感可以使这个问题得到减轻。此外，晶闸管控制可以设置在变压器的一次绕组中，在这种情况下，由变压器本身可以获得一定的滤波作用。电感以上述任何一种形式

㊀ 传统的可调斜率/可调电感设备已经被开发出来了，但价格昂贵且复杂[25]。

的应用都是一个有效的滤波方法，但它确实限制了电源的动态响应。

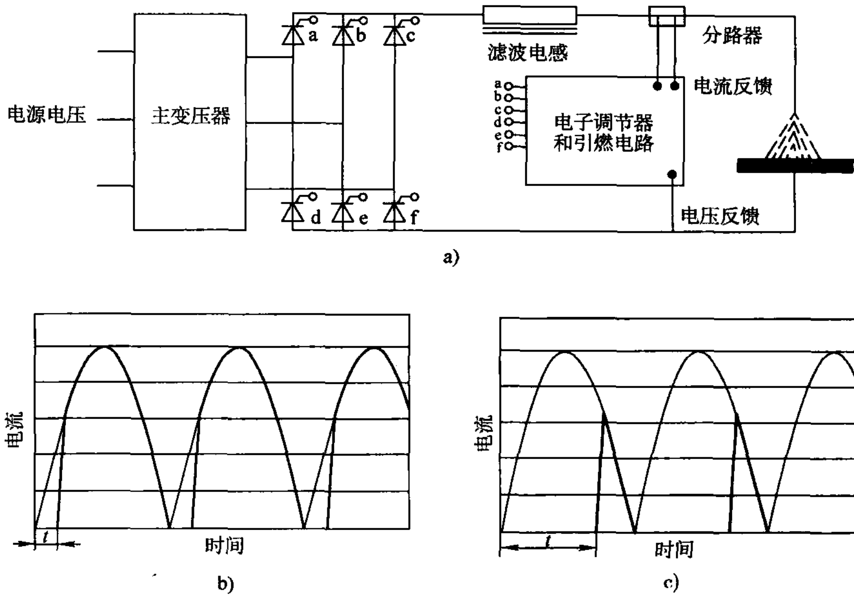


图 3.6 单相晶闸管相控电路（三相）和受控波形
a）a ~ f 是晶闸管器件 b）小控制角高平均电流
c）大控制角低平均电流

将晶闸管器件‘背靠背’连接起来可以获得交流输出，其中一组在正半波导通，而另一组在负半波导通。此外，通过使用电感或逆变电路（图 3.7），可

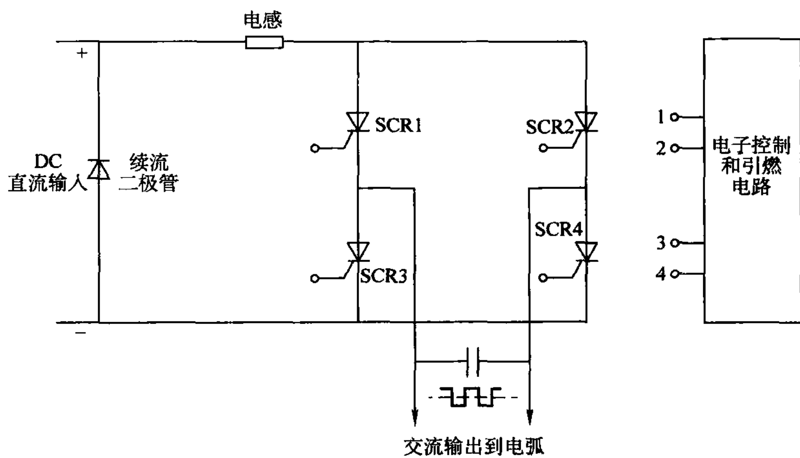


图 3.7 用于弧焊的简单二次侧整流器

以产生方波输出，这种波形对钨极气体保护焊、手工电弧焊和埋弧焊都是有利的。这类控制方法的优点是简单、鲁棒性强和可以获得大幅值，使得大功率输出可以通过很小的电子信号来控制。当调节引燃角之后，只有当电流过零后引燃角的改变才会生效，这限制了系统的响应速度，因此，可以预期的最佳响应时间是在 3 ~ 10ms 之间。

即使有脉动和响应速度的限制，但与以前的传统设计相比，晶闸管控制电源的性能也有较大的改善，特别是可以通过反馈控制来稳定电源的输出。晶闸管相控系统已经用于直流手工电弧焊、熔化极气体保护焊、方波交流钨极惰性气体保护焊[28,29]和埋弧焊等焊接方法的电源中。

3.4.2　晶体管串联调节器

晶体管的输出可以通过调节基极电流来控制。在串联调节器中，晶体管与直流焊接电源串联，通过调节基极电流可以连续调节输出功率。通常还有一个反馈控制系统来保证输出稳定性，有一个放大器来为晶体管提供驱动信号（图 3.8）。

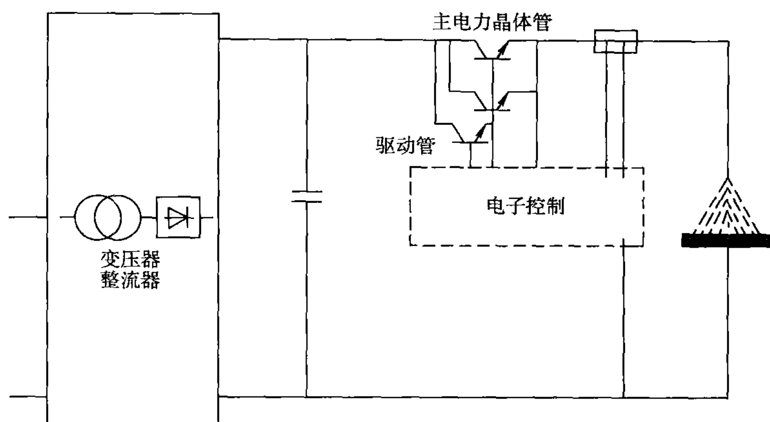


图 3.8　晶体管串联调节器原理

直到最近，单个晶体管的容量仍有限，处理典型焊接电流需要采用大的晶体管组（并联）。但最近大功率晶体管的应用使这个问题得到缓解。晶体管串联调节器的重要特性是响应速度快（晶体管的响应时间以毫秒来度量）和无脉动输出[30]。系统的主要缺点是效率低、成本高。效率低是由于一部分功率以系统生热的形式损失了，并导致在大多数情况下需要水冷。设备成本是所用元件数量的函数，同时还需要平衡各晶体管以保证电流平均。这类电源的高响应速度、高精度和低脉动使其适合于小型的高精度电源，特别是适合于研究工作。目前已经有依靠晶体管串联调节控制的钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊和埋弧焊电源。

3.4.3 二次侧开关晶体管电源

晶体管在串联调节器中的高热损耗是由它们的连续工作方式导致的。调节输出的另外一种方法是对晶体管进行快速接通和断开。这样平均输出电平就是接通、断开时间比的函数（图 3.9）。尽管这种电路设计与串联调节器很相似（图 3.10），但这种元件通断控制方式使效率显著提高，从而可以采用一般的空冷方式。虽然输出波形中存在间断，但如果开关频率足够高，则这种间断波形对过程无任何有害影响，而常见的开关频率通常在 1000 ~25000Hz 间。电源的响应速度也取决于开关频率，而高频率电源能在几毫秒内作出响应，这比传统电源快得多，接近串联调节器的速度。目前已开发出这种类型的熔化极气体保护焊和钨极惰性气体保护焊电源，在 500A 以下的电流范围内均可实现很高的精度，同时成本也较低。

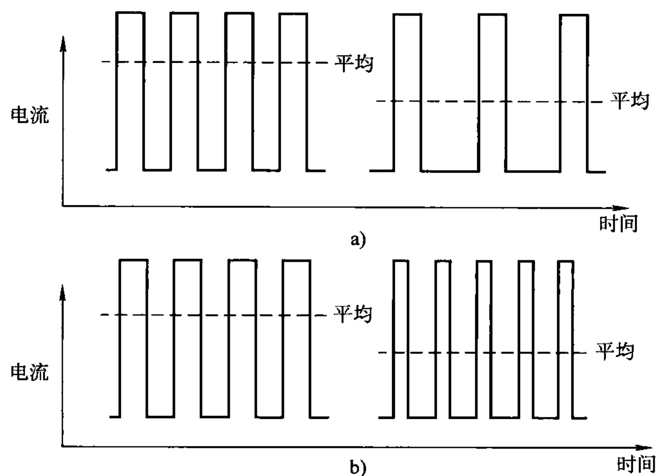


图 3.9 输出控制调制技术

a）频率调制 b）脉宽控制

3.4.4 一次侧整流-逆变器

前述控制方法应用传统变压器来获得焊接所要求的电压降。变压器输入频率为 50Hz。而一次侧逆变器的设计却是通过增大变压器工作频率来显著减小变压器尺寸。基本电路如图 3.11 所示，工作原理如图 3.12 所示。

一次交流电压首先被整流得到直流高电压，再将直流电压通过逆变器转换为高频交流电，此时才输入变压器。由于工作频率在 5 ~100kHz 之间，变压器体积很小。此外，通过在逆变器中进行限幅或相移来实现输出控制，可以获得很高的

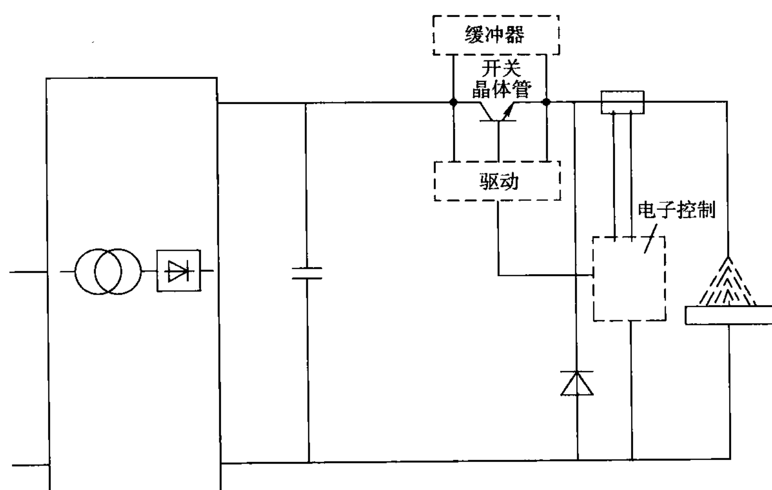


图3.10　电路原理-开关控制

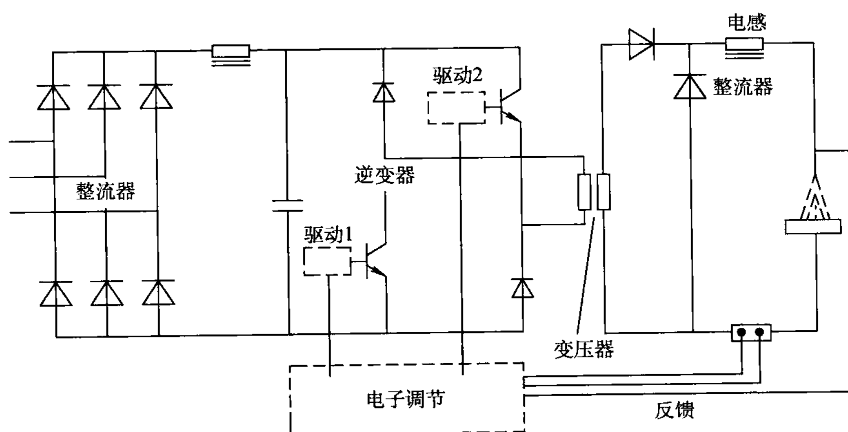


图3.11　典型逆变器电路

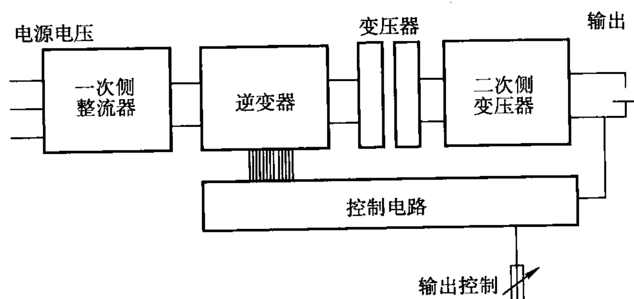


图3.12　一次侧整流器-逆变器

响应速度。变压器输出必须进行整流，以避免高频交流电路中的电势损失。

焊接电源的输出是光滑和稳定的，尽管响应速度不可能达到串联调节器的水平，但它足够产生当前焊接过程控制所要求的输出特性。这种电路最初应用于手工电弧焊电源，目前也应用于钨极惰性气体保护焊和脉冲熔化极气体保护焊的电源中。它具有特别好的电效率，250A 电流条件下与传统电源的对比表明，其空闲功率损耗仅是传统电源的十分之一；在焊接过程中，逆变电源的效率约为86%，而传统电源为52%[31,35]。

3.4.5 混合型设计

可以联合应用上述电子控制技术来提高电源性能和成本效率。例如，首先采用二次侧断续器对电源进行预调节，然后用一个小空冷晶体管串联调节器进行最后的输出控制，这在参考文献［32］中进行了介绍，电路如图 3.13 所示，这种方法的优点概括于表 3.1 中。通过在直流相控单元的输出端增加二次侧逆变器，混合式设计也可以用来产生交流方波输出。晶闸管相控电源可以与晶闸管逆变器一起使用[33]，或系统也可以基于集成的一次侧整流-逆变器设计。复杂的混合型实验装置已经开发出来了，用于如高频交流等离子弧焊[34]等方法，以研究过程控制的改进潜力。

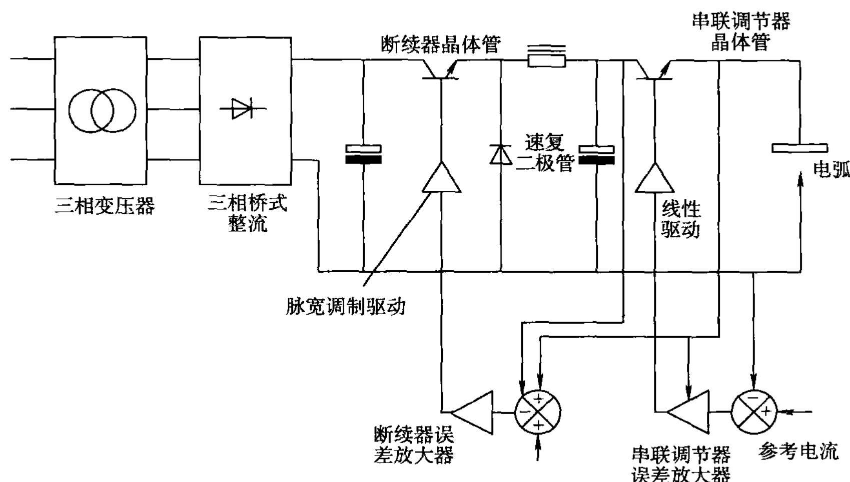


图 3.13 用于 GTAW 的混合断续器/串联调节器电源[33]（courtesy PEC Ltd）

其他类型的电源，如不对称晶闸管整流器（ASCRs）[35]或金属氧化物-硅场效应晶体管（MOSFETS）也可以用于改进传统电子电源和混合电源系统的效率。

表3.1 300A GTAW电源采用串联调节器和混合系统的对比

特 点	混合断续器-串联调节器[30]	传统串联调节器
最大耗散	2kW	8.5kW
晶体管	4个大电流元件	100个以上小电流元件
脉动	<2A峰值	<1A峰值
总成本	设备和安装成本低	昂贵-劳动密集型
响应	最大150kHz，1ms上升时间	最大1Hz，100μs上升时间
精度	最大电流的1%	最大电流的1%
通断频率	1.5Hz	N/A

3.4.6 电子电源设计特点

电子设计都具有遥控能力，在电源内与系统控制器的连接或与外部电源的连接都容易实施。输出响应、精度和可重复性通常远远优于传统的电磁控制系统，各种设计的特点概括于表3.2中。

表3.2 各种电源设计的特点

电源类型	输出特性	电效率	物理特性	相对成本	应 用
传统抽头式变压器-整流器、动铁式、可调电感、磁放大器式等	在设计阶段固定，响应速度慢，无电源电压稳定功能	中等，但在变压器中有励磁电流和热损失	相对较重，工业单元体积较大，但鲁棒性好、可靠	1	手工熔化极气体保护焊、手工电弧焊、钨极气体保护焊，普通制造业
晶闸管相控	在开关系统的响应限内电子可调，有电源电压稳定功能，但脉动大，特别是低输出时	中等	由于磁（绕组）构件的减少，比传统设计更紧凑	4	手工和机械化熔化极/钨极气体保护焊和手工电弧焊，中、高质量制造
晶体管串联调节器	响应速度很快，控制灵活，有波形控制，精度高，无脉动，可重复	差	相当大，可能需要水冷	6	高质量机械化和自动化熔化极和钨极气体保护焊。精密工程和研发
一次侧整流器-逆变器	响应速度快，输出可调、稳定、可重复	很好	紧凑-电子电路复杂	3	中、高质量要求的手工电弧焊和自动焊电源，适用于多种焊接方法
混合和二次侧断续器	响应速度快，输出可调、稳定、可重复	很好	中等尺寸，空冷	4	中、高质量要求的手工电弧焊和自动焊电源，适用于多种焊接方法

要从这个表中选出一种理想化的设计是不可能的，但串联调节器设计一般只用于精度很高的场合和研究目的，而基于一次侧逆变器的设计最为经济，并适合于各种生产任务。这些系统共有的一个重要特点是应用反馈控制。

反馈控制在电子电源方面是有用的技术，并且能够有效应用。该技术的基本原理如图 3. 14 所示，首先测量系统输出并与期望输出进行比较，比较后的差值形成误差信号，然后反馈系统调节输出来消除这一差值。尽管这种控制可以应用于传统的电源设计，但一般成本高、结构复杂并且响应速度慢。因此，大多数传统电源都采用开环控制，即如果输入变化，输出也成比例变化。电子控制系统较高的响应速度和低信号电平使得闭环控制或反馈控制既有效又经济，并给予输出以固有的稳定性。

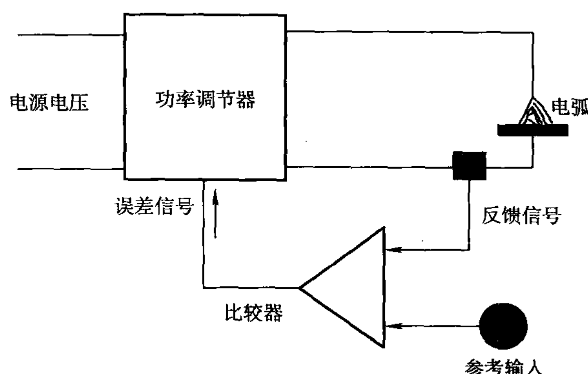


图 3. 14 反馈控制原理

3. 5 输出水平、顺序和功能控制

对大多数焊接过程，当过程开始或结束时，必须遵循一个预定的任务程序。此外，电流上升或衰减速度也需要进行控制，焊接过程中的输出也可能需要进行调节。这些特性的实现程度在过去受到传统电源设计技术及继电器逻辑和电气控制技术的限制。为了改进顺序控制的灵活性和精确性，目前采用了两个新方法：分立电子控制和微处理器控制。

3. 5. 1 分立元件电子控制

前述电子功率调节电路所要求的驱动控制信号电平通常较小，可以取自电子逻辑电路。可以应用标准模拟和数字元件（如计时器、可编程逻辑阵列、功率调节器、运算放大器和比较电路）配置这些电路，并封装在一个芯片中，从而执行最复杂的任务。在成本、速度、精度和长期可靠性等方面，这些系统的性能

远远优于以前的继电器逻辑设计。但通常分立电子控制电路是为特定电源定制的，其功能和操作范围在设计阶段就固定了。将焊接控制参数存储在可编程只读存储器（EPROM）芯片中增加了分立电子电路设计的灵活性，当工艺参数进行了改进或增加了新功能后，设备的制造商可以很容易地重新进行编程并替换原程序。

3.5.2 微处理器和数字信号处理器控制

另一种电源设计方法是使用微处理器控制，这种方法具有更大的灵活性，并能提供很多附加功能。一个微处理器芯片可以同时完成焊接顺序控制和输出功率调节两个任务。

微处理器控制系统的设计如图3.15所示。微处理器按顺序执行一系列指令和计算，但某些重要任务的优先级可能高于其他任务，例如在焊接过程中，要求它每隔0.3ms检查一次输出电流，而除非焊接过程停止，前面某些控件的状态在这时可能就会被忽略。在输出的实时控制方面，这类系统的效果取决于模数转换器的分辨率、微处理器的运行速度（时钟频率）和软件设计。一种典型系统，时钟频率为12MHz的10位模数转换器，可以每隔0.3ms检查和修正输出偏差，使电流偏差处于期望值的1%之内。

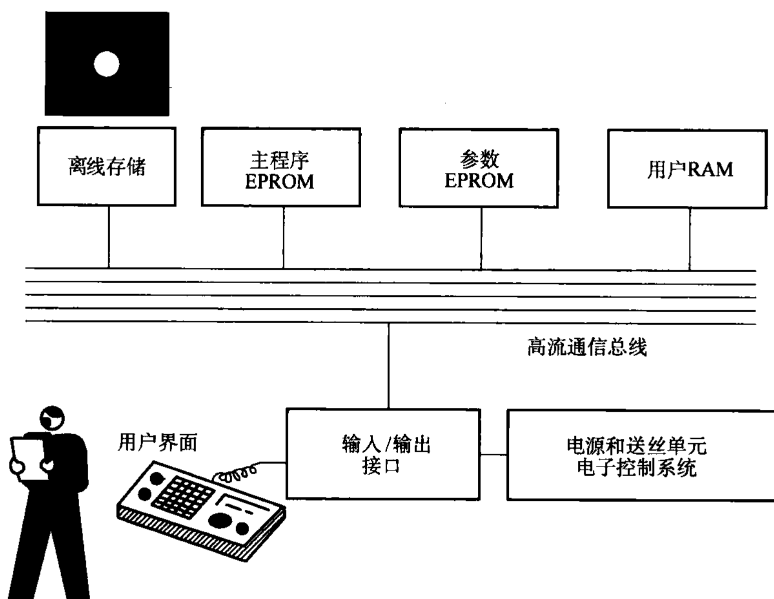


图3.15 微处理器控制系统

一种称为数字信号处理器（DSP）的特定形式微处理器目前应用比较普遍。

这些装置的规格各不相同，但通常包含如第2章所述的监测、控制和外部查询所需要的各种外围设备和通信装置。它们提供一种能实现复杂控制的可靠和节省成本的方法，并有助于实现将在第7章介绍的协同控制。

尽管专用微处理器控制方法不允许完全的设计灵活性（软件通常意味着较大的投资，其修改也耗费资金），但设计者可以根据焊接工艺的要求，在微处理器中内置改变某些参数。这可以用于简化设备操作，并给用户提供对重要的工艺参数重新编程的条件。

3.5.3 编程和单键式控制

像熔化极气体保护焊中那样，采用单一旋钮设置复杂参数并不是新概念，使用预设送丝速度和电压及单一条件选择器开关的电源在70年代中期就已应用。但是，如果没有电子反馈控制，需要使用新颖的、但不可靠的电源电压稳定方法。借助于电子功率调节和反馈控制，制造商或用户都可以用可靠的、‘优化’的焊接条件对电源进行编程。如果使用前述的微处理器控制系统，焊接参数的编程和存储就会更加容易。

3.5.4 外部计算机控制

通过外部微机对电子电源进行控制也有应用。这主要是用于研究目的，以对各种不同工艺参数的影响进行研究。但目前很多微机控制的电源都与主机有通信功能，采用标准串行通信协议（RS232、RS423、USB、CAN等），允许焊接参数被‘下载’到设备中，并具有遥控和监测功能。这个技术也可以用于实际生产中，涡轮转子维修焊接机器人遥控系统就是一个很好的例子。

3.6 电子电源调节和控制的实际意义

焊接电源技术的上述变化有重要的实际意义：这些电源可以采用现代电子装配技术来制造，减少了对昂贵原材料（如制造变压器磁心的铁、制造绕组的铜）的依赖性。这使制造商能以与传统电源相似的价格提供这些先进电源。这些设计也为用户提供如下好处：

1）提高了可重复性。

2）设置更为容易。

3）加工能力提高。

可重复性提高对焊接接头质量和保持焊接参数在要求范围内有直接的影响，而且有可能减少第2章所讨论的维修和返工的成本。设置更容易，会提高操作效率，并减少操作错误。加工能力的提高归因于能够在焊接过程中改变电子电源的

各种输出参数。输出特性不是预先确定的，而是可以改变的（在变压器输出范围之内)，因此可以得到更好的效果。例如，在熔化极气体保护焊时，可以使用恒流输出特性改进控制过程，其输出可以用动态变化来提供自调节。在手工电弧焊系统中，在低电压时电流可以瞬间增大以防止电极粘附。这些特性将在后续章节中更详细地讨论。为了有效利用电子电源，用户还需要考虑技术支持和培训。维修和维护这种设备所需要的技术与传统电磁电源所需要的技术是不同的。

3.7 本章小结

传统电源设计对于简单的低成本应用仍是可行的。例如，抽头式变压器/整流器类型熔化极气体保护焊机的价格要比同样额定电流的电子电源低约 60%。但是，通常电子电源设计在输出一致性、灵活性等方面提供了更佳的性能，并提供了更强的过程控制的可能性[36]。

先进焊接电源使用了各种电子功率调节技术，并采用分立元件电子电路或微处理器进行顺序控制或输出控制。

第4章　弧焊填充材料

4.1　简介

熔焊过程中的一些重要焊接材料包括：手工电弧焊使用的焊条、埋弧焊使用的焊丝和焊剂、熔化极气体保护焊和药芯焊丝自保护焊使用的焊丝。

对于手工电弧焊和埋弧焊等传统焊接方法，关于焊接材料的设计和开发工作仍在研究中，其主要方向为使焊接材料满足新材料焊接时高性能的要求，同时也有部分研究目的在于提高焊接过程中的工艺裕度和过程稳定性。用于填充焊丝连续进给的熔化极电弧焊过程，如气体保护焊等，填充材料基本没有变化。但在药芯焊丝的开发和应用方面，焊接材料研究取得了巨大的进展。

4.2　手工电弧焊材料

目前可获得的手工电弧焊材料范围非常广泛，既包括用于重要工程材料连接的焊条，也包括修复、表面工程、切割和气刨等过程使用的材料（见附录2）。针对这些材料所产生的主要技术进步体现在如下方面：

1）韧性提高。

2）针对铁素体钢焊条氢控制能力的提高。

3）不锈钢焊条性能的提高。

手工电弧焊广泛应用于船舶制造、国防工业、海洋工程及电站系统等工业领域，用于焊接碳锰钢及其他低合金钢。这些工程应用中，良好的韧性以及抵抗氢致冷裂纹的能力是需要重点考虑的内容。

4.2.1　韧性提高

很多结构，特别是海洋工程及低温工程中，其设计工作温度远低于0℃，通过控制焊条成分及添加镍元素[37]，工作温度低于－40℃的铁素体钢用焊接材料的韧性得到了提高。这种性能的提升体现在一系列铁素体钢手工电弧焊焊条的V形缺口韧性的提高中，相应结果列于图4.1中[38]。

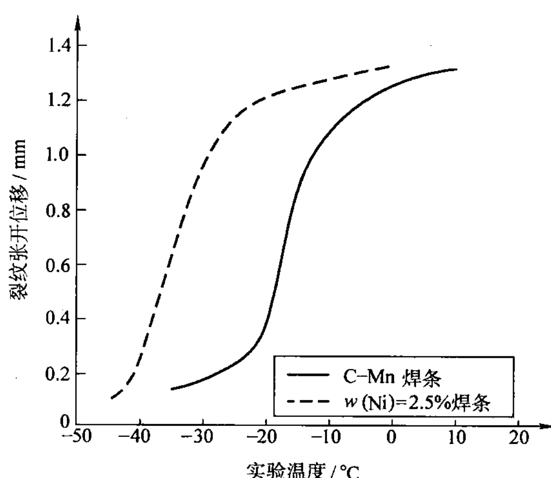


图 4.1 手工电弧焊用焊条缺口韧性的提高[38]

4.2.2 氢控制水平的提高

低合金钢与高碳钢焊接时，特别是厚大断面产品焊接时，氢致冷裂纹（HICC）和氢助冷裂纹（HACC）一直是一个重要问题。控制焊缝金属中的氢含量可以用于避免冷裂纹，而焊缝金属中氢含量的控制又可以通过改进焊条配方、存储方法和包装方式等措施得到改善[39]。人们对焊接过程中限制水蒸气（氢的主要来源）再吸收方面给予了特别的重视，通过焊条药皮成分的精心选择以及特殊的包装，已经成功地达到了上述目的。已研制出的低氢焊条打开包装后放置在35℃、90%相对湿度的环境中10h后，仍能够实现焊后焊缝金属中的氢含量低于50mL/kg[40]。

4.2.3 不锈钢手工电弧焊用焊条

普通奥氏体不锈钢手工电弧焊用焊条的工艺性通过引入 TiO_2 基焊条药皮得到了极大的改善，这种药皮提高了电弧稳定性，并且焊缝表面成形优异。针对新的耐蚀合金，特别是双相不锈钢和高钼不锈钢等材料也研制了专门的焊条[41]。

4.3 埋弧焊材料

埋弧焊过程已经比较成熟，而且对于常规应用已经开发出系列的标准化焊丝和焊剂材料，但针对这一方法仍有两个重要的技术进步：高韧性焊接材料的开发和铁粉的添加。

4.3.1 高韧性焊接材料

对于海洋工程结构，需要在 -40℃以下仍具有一定的冲击韧度，基于此，开发出了具有更高韧性的埋弧焊材料，通过采用钛、硼等元素对焊丝进行微合金化，辅以半碱性焊剂，提高了焊接材料的韧性[42]。相比于传统的 SD3 埋弧焊焊丝，新焊丝夏比 V 形缺口冲击值更高，体现出其韧性的增强，这些结果列于图 4.2 中[43]。

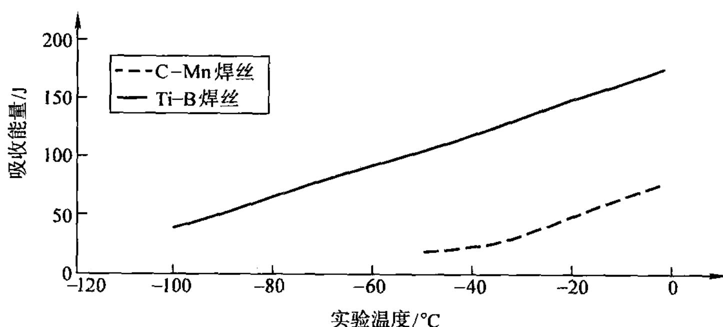


图 4.2 高韧性埋弧焊材料：采用不同的埋弧焊焊丝获得的具有更低的夏比 V 形缺口脆性转变温度曲线

4.3.2 铁粉的添加

在埋弧焊过程中添加铁粉可以提高熔敷速率 60% 以上[44-46]，同时还能够提供更理想的焊缝金属质量。这一技术的实现得益于埋弧焊过程中经常会产生过多的热量，这通常会导致母材金属熔化量增加，并降低填充金属在焊缝中的比例。如果在焊接熔池中添加铁粉，部分电弧热量会使添加的铁粉和焊丝熔化，提高了接头完成的速度。不同于其他增加焊接过程生产率的方法，这一技术降低了母材的热输入，相应地降低了热影响区的热损伤。

铁粉可以采用如下三种方法添加到接头中：

1）焊前添加到接头中。

2）使用专门的送粉系统在焊接过程中添加。

3）在焊丝表面磁吸附铁粉。

研究发现[47]，焊前添加铁粉可以大幅度降低总体的热输入量，同时生产率显著提高，这对于细晶粒钢、低合金高强钢等材料尤其明显，因其抑制了高热输入对这些钢种热-机械处理强化的破坏。热-机械处理一般用于提高这些钢种的力学性能。

这一技术已经应用于海洋工程中高韧性钢材的焊接制造。据报道[39]，在某典型细晶粒钢（BS 4360 50DD）50mm 厚单 V 形坡口对接焊中，采用前向送丝系统，配以碱性焊剂和锰含量（质量分数）为 1.7% 的焊丝，夏比 V 形缺口获得的冲击吸收功在 -40℃ 达到了 173J。

4.4 GMAW（熔化极气体保护焊）和 FCAW（药芯焊丝电弧焊）用焊丝

熔化极气体保护焊方法应用量的增加促进了实芯焊丝及保护气体的发展，但该领域最显著的进步体现在药芯焊丝方面[48]。

4.4.1 熔化极气体保护焊用实芯焊丝

实芯焊丝通常具有与需要焊接的材料相同的化学组分，微小的成分调整，如加入抑制氧化的组分，已经在改善熔滴过渡和焊缝成形等方面得到验证，但材料成分可调整的范围非常有限。虽然早期研究中通过对焊丝的表面处理改善了熔滴过渡[49]，但在大部分情况下，由于其也会导致焊丝表面镀层破坏，因此并不利于工程应用。

最近开展的在焊丝中添加稀土材料的研究表明纯氩气气氛下钢焊丝的熔滴过渡得到改善，但除非焊缝金属中的氧含量可以控制在非常低的水平（比如 $w(\mathrm{Ni})9\%$ 的钢采用同质焊丝时）。这一研究基本不具有实际意义。熔滴穿过电弧过渡到熔池的过程中，熔滴金属可能发生的氧化，会降低合金元素的含量，当然，这取决于保护气体的氧化性以及相应合金元素的活性。

研究还发现[50]铁素体焊丝中残余化学元素含量的微小变化，对接头的低温韧性有非常显著的影响，这种残余化学元素的微小变化，对于大部分应用而言不足以改变接头性能，但对于苛刻的低温接头却可能有显著影响。

对于低碳钢焊丝，已经发现，过厚的镀铜层会产生送丝障碍。人们也一度担心镀层中的铜产生的烟尘会增加健康危害。因此开发出了无铜焊丝，通过表面润滑处理，其送丝性能优异。而且研究还发现[51]这种焊丝可以降低呼吸区域的烟尘水平。但无铜焊丝端部磨损严重，成为人们担心的主要问题。镀铜焊丝中镀铜层可以控制为相对较薄的一层，这在目前已经比较普遍。研究表明，较薄的镀铜层克服了送丝和烟尘问题。

4.4.2 药芯焊丝

药芯焊丝由外层金属包套及填充于其内的矿物质焊剂和金属粉末混合物组成，如图 4.3 所示，药芯焊丝电弧焊过程与常规熔化极气体保护焊相似，其过程

和原理示于图4.4中。制造药芯焊丝过程中最常见的技术和方法为：将金属扁带卷制成U形，在其中添加特定成分的焊剂，使U形截面合口并形成封闭的圆形截面，通过拉拔工艺减小截面直径。

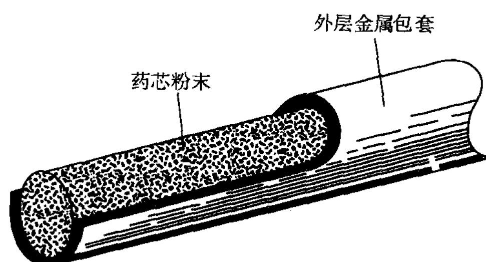


图4.3 药芯焊丝的构成

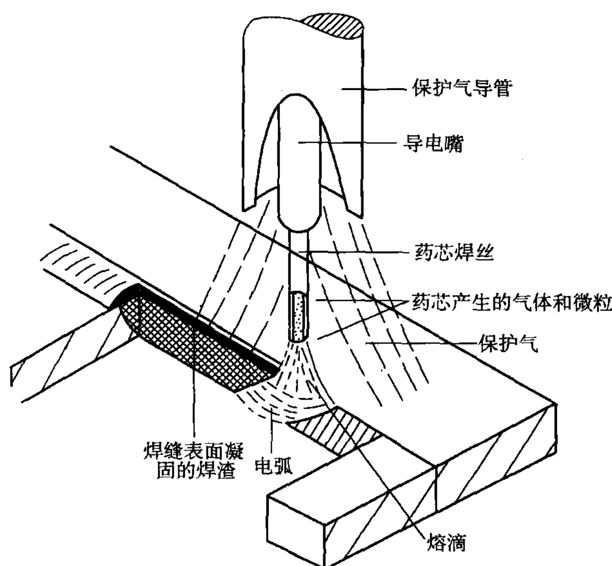


图4.4 药芯焊丝焊接过程和原理示意图

药芯焊丝的生产过程示于图4.5中，在缩减截面过程中，U形截面合口时产生的缝隙会闭合。在薄带卷制过程中改变搭接或卷制方法，可以形成其他形状的焊丝截面，如图4.6所示。还可以通过在圆管内直接填充焊剂，然后减小其截面的方法制造药芯焊丝。制造完成的药芯焊丝典型直径在3.2～0.8mm之间。药芯焊丝具有如下优点：

1）高熔敷速率。

2）药芯中可以添加合金元素。

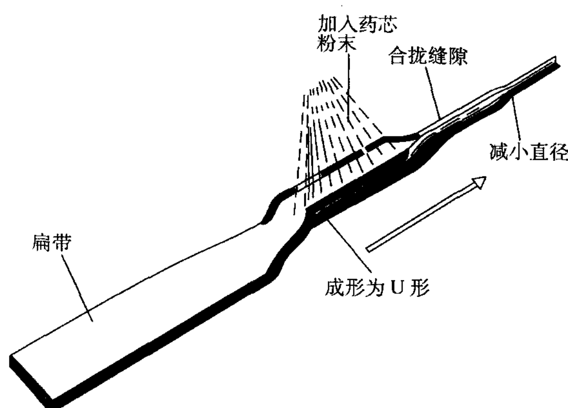


图4.5　药芯焊丝的生产

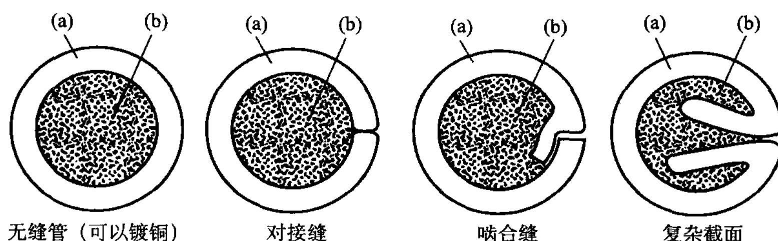


图4.6　各种药芯焊丝的结构

（a）—外层金属包套　（b）—药芯粉末

3）焊渣保护。

4）改进的电弧挺度和保护效果。

1. 熔敷速率

药芯自保护焊接的熔敷速率明显高于手工电弧焊的熔敷速率，也比采用实芯焊丝的熔化极气体保护焊高，药芯焊丝所获得的高熔敷速率归功于增大的电流密度而且全部电流作用于金属包套，这样熔敷速率取决于包套材料的厚度和电阻率、极性以及焊丝干伸长，如图4.7所示。药芯焊丝的熔敷速率 MR 可以表示为

$$MR = k + \alpha I + \beta l I^2/A \tag{4.1}$$

其中，k、α、β 为常数，I 为平均电流，l 为焊丝干伸长，A 为导电部分的截面积。αI 项代表电弧产热导致的金属熔化而 $\beta l I^2/A$ 对应着焊丝干伸长部分的电阻热（附录3给出了反映这种对应关系的典型熔化曲线）。从这一公式可以明显地发现，通过增加焊丝干伸长和焊接电流，可以大幅度增加熔敷速率。

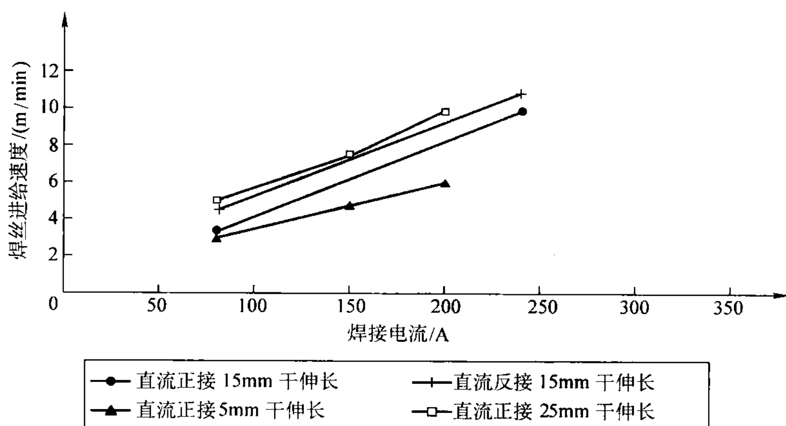


图 4.7　极性加焊丝干伸长对药芯焊丝熔敷率的影响

2. 合金元素的添加

熔化极气体保护焊实芯焊丝的成分范围由于技术和商业问题而受到限制，这些问题主要在于生产合金成分中仅含微量合金组元的相应材料。然而，药芯焊丝的成分却可以通过药芯成分的微小调整得到改变，从而生成一定范围内变化的焊缝金属成分和操作特性。对于普通碳钢和不锈钢，可获得的药芯焊丝成分范围与手工电弧焊用的焊条相当（澳大利亚，英国和美国的药芯焊丝分类列于附录 4 中）；TiO_2 基药芯焊丝可以获得良好的工艺性，碱性（CaO 基）药芯焊丝可以获得高韧性，低氢成分药芯焊丝、铁粉基药芯焊丝可以获得优异的清渣性能。

利用药芯焊丝技术，还能够在普通低碳钢包套基础上制造焊接不锈钢的低成本焊丝以及高度合金化、高硬度的低成本堆焊材料。

3. 焊渣保护和维持

可以通过焊渣特性的设计提高焊接过程的工作情况。例如，可以使用快速凝固的 TiO_2 基焊渣在立焊或仰焊时维持熔池，以使用更大的焊接电流，提高生产效率，获得更好的熔化特性。再如，焊渣特性可以调整为能够提供额外的保护，并控制焊缝成形，对于下文中将讨论到的不锈钢焊接，这些特点尤其重要。

4. 电弧挺度及保护

正如在手工电弧焊中药皮的作用一样，药芯中组分的分解可以用于产生保护性气体。例如，碳酸钙分解可以产生二氧化碳：



$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 \tag{4.2}$$

也可以在药芯中加入促进电弧电离的物质以获得增强的使用性能及电弧挺度。这些技术也可以用于焊条制造中，以生产适于交流电源或直流反接的焊条，而这可能在熔化速度和焊缝成形等方面具有有利影响。

4.4.3　操作模式

不论是否使用保护气体，药芯焊丝都具有良好的操作性。

1. 自保护操作模式

在自保护药芯焊丝内，焊剂必须提供足够的保护以避免熔化的金属液滴在形成和穿过电弧过程中受到空气的污染。由于电弧中不可避免地会卷入少量的氮和氧，需要经常针对这一点对焊缝金属的成分进行调节（例如加入少量的铝）。除了这种保护功能外，药芯还必须提供电弧挺度、添加合金元素和控制焊渣等功能，这样合适的焊剂成分匹配就变得更加困难，但仍然开发出了几种成功的焊接材料。在现场风力比较温和的工作条件下，这些自保护焊丝确实体现出了实用性，然而对焊剂设计的需求主要在于解决当前焊丝工艺范围窄的问题，例如，对一些应用于全位置焊的药芯焊丝，焊接电压与推荐值的偏差必须控制在 ±1V 的范围以内，这样才能保证达到所需的焊缝力学性能并控制气孔。当采用额外气体进行保护时，可以减少上述的限制。

2. 气体保护模式

如果使用传统的气体保护焊焊炬，对药芯焊丝也可以提供同轴气体保护。当焊接低碳钢时，最常使用的是二氧化碳或氩气/二氧化碳混合气体，这样允许实现全位置焊接，提高焊缝机械性能，允许较宽的工艺范围，而且虽然额外保护气体的使用看似增加了成本，但焊接全过程的成本却可能降低。

4.4.4　药芯焊丝的种类

目前已开发出的药芯焊丝主要有以下几类：

1）碳钢和低合金钢用焊丝。

2）表面硬化和表面合金化用焊丝。

3）不锈钢用焊丝。

1. 碳钢与低合金钢用焊丝

这些焊丝的详细信息列于附录5中，但为了讨论方便，它们可以被划分为如下几类：

1）二氧化钛气体保护焊丝。

2）碱性气体保护焊丝。

3）金属药芯气体保护焊丝。

4）自保护焊丝。

2. 二氧化钛气体保护焊丝

二氧化钛气体保护焊丝具有出色的操作性能，优异的全位置焊功能，良好的清渣性能，力学性能也相当于或优于低碳钢实芯焊丝。通过加入镍进行合金化，

还可以获得良好的低温冲击吸收功（-40℃时100J）。

3. 碱性气体保护焊丝

碱性气体保护焊丝能提供满足要求的操作性能，较宽的焊接参数范围和非常优异的力学性能，也能够在焊接低合金钢或低合金高强钢时提供合金化。但这类焊丝全位置焊性能较二氧化钛气体保护焊丝差，特别是直径较大时。

4. 金属药芯气体保护焊丝

金属药芯焊丝中仅含非常少的矿物质焊剂。药芯中的主要组分是铁粉或铁粉和铁素体合金的混合粉末。在氩气/二氧化碳混合气体保护下，这类焊丝能够提供非常平稳的熔滴喷射过渡，特别是电流在300A附近时。当然，这类焊丝也可以用于短路过渡和脉冲模式等平均电流较低的条件下。这类焊丝产生的焊渣量最少，特别适用于机械化焊接。

5. 自保护焊丝

自保护焊丝可用于平焊和全位置焊接，同时也有少量这类焊丝可用于接头韧性需求较高时的焊接，与二氧化钛焊丝一样，一般通过添加镍进行合金化以满足更高的韧性要求。这类焊丝在海洋工程方面得到了大量的应用[52]，这些领域中的应用表明，在现场条件下，通过对焊接参数进行精密控制，能够稳定地获得高韧性接头。

6. 表面硬化与表面合金化用焊丝

多种用于表面硬化和表面合金化的焊丝以药芯焊丝形式生产出来（附录5中提供了各种常规表面硬化用药芯焊丝的概况）。这些合金化元素包括低碳钢、奥氏体不锈钢、高铬合金、碳化钨、镍基合金以及钴基合金等焊接材料。这些焊丝很多都具有自保护功能，并且以在现场应用为目的。然而其工艺性通常不如上面介绍的结构钢用焊丝理想，主要原因在于焊丝芯部添加了大量的合金化元素，增大了合金元素与电弧稳定成分的比值。但这类焊丝提供了在材料表面堆焊耐磨、耐腐蚀材料的高性价比方法。

7. 不锈钢焊丝

不锈钢药芯焊丝已经研发出来，并且对于大部分常见的抗腐蚀材料都可以获得相匹配的焊接材料。目前气体保护的金属芯焊丝和二氧化钛基焊丝都可以在市场获得，后者具有尤其出众的操作性能，更广的参数区间，更少的飞溅和优异的表面光整程度。

4.4.5 药芯焊丝的操作因素

气体保护药芯焊丝一般情况下比熔化极气体保护焊中的实芯焊丝更容易使用，但在操作过程中仍存在着一定的差别。前面已经介绍过，药芯焊丝对于干伸长更敏感，更长的电极（焊丝）干伸长提供了更高的熔化速度。但在气体保护

药芯焊丝焊接时，焊丝伸出长度可能会受到限制，以避免过大的干伸长导致有效的二级保护受到破坏。在自保护药芯焊丝焊接时，可能会需要特别长的干伸长，以获得高熔敷速率，这时一般建议使用绝缘导块和吸尘组合系统，如图4.8所示。

一般情况下不希望采用特别短的干伸长。例如，研究发现，在短干伸长条件下并使用二氧化钛基药芯焊丝进行全位置焊时，在快速凝固的焊渣与焊丝表面过多的润滑剂共同作用下会产生表面气孔，采用向下立焊时这种缺陷尤其严重。增加干伸长将使过多的表面润滑剂被消耗掉从而避免该问题。短的焊丝干伸长还会使焊缝金属中氢含量增加。对于手工操作而言，最小干伸长取决于气罩和导电嘴间的相对位置，如图4.9所示。虽然对于焊接参数范围较窄的自保护焊丝可能需要使用电压稳定的焊接电源（第三章讨论的电子器件设计将符合电源设计的需求），但用于药芯焊丝焊接的设备基本上与常规气体保护焊设备相同。对于所有的药芯焊丝，还有一点特别重要的就是需要使用特殊设计的送丝轮，以避免送丝系统将焊丝压塌。

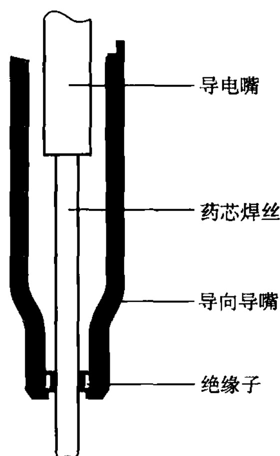


图4.8　长干伸长所用的绝缘导嘴及吸尘系统

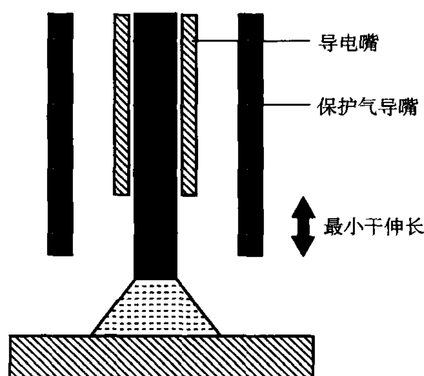


图4.9　通过调节导电嘴和保护气导嘴限制最小干伸长

4.4.6　药芯焊丝的应用

药芯焊丝的应用包括焊接服役条件苛刻的厚大的高强度钢、轻薄结构高速自动化焊接以及制造高质量的不锈钢反应容器等。

4.4.7 药芯焊丝的局限性

药芯焊丝比较明显的局限性包括以下方面：

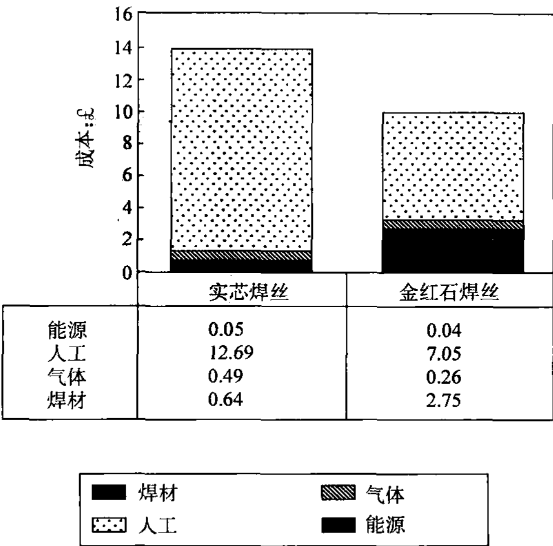
1）成本。

2）烟尘。

3）焊丝质量一致性。

1. 高成本

药芯焊丝的成本可达到实芯焊丝的四倍，但同时还需要考虑到药芯焊丝使用带来的效率提高以及焊接材料成本在焊接制造全部成本中仅占相对很小的一部分（见第二章）。事实上，药芯焊丝的使用经常能够降低成本。以 25mm 厚 BS 4360 50D 材料立焊对接并开 V 型坡口为例[53]，实验研究发现，相比于实芯焊丝熔化极气体保护焊，使用二氧化钛基药芯焊丝使接头总成本降低了 28%，成本降低源于生产效率的提高，导致的人工成本降低（药芯焊丝可以使用更高的平均电流焊接），这些实验结果列于图 4.10 中。



	实芯焊丝	金红石焊丝
能源	0.05	0.04
人工	12.69	7.05
气体	0.49	0.26
焊材	0.64	2.75

图 4.10 采用金红石药芯焊丝焊接对接接头时引起的综合成本下降

2. 烟尘

由于熔化速率高，存在矿物质成分的焊剂以及通常需要连续操作，药芯焊丝不可避免地比手工电弧焊和实芯焊丝气体保护焊产生更多的颗粒性烟尘，虽然这些颗粒大部分可以看作为具有相当强惰性的灰尘；部分焊丝和焊剂中的成分会产生有毒的物质，含铬焊丝中产生的六价铬以及一些自保护焊丝中产生的钡的化合

物是需要给予主要关注的方面。

药芯焊丝焊接时产生的颗粒性烟尘，特别是其中可能具有毒性的气体的含量必须给予严格控制，以满足健康和安全标准。这通常在现场使用排风系统予以实现。

3. 焊丝质量一致性

药芯焊丝的制造比实芯焊丝更加复杂，但在某种程度上与手工电弧焊所用的焊条制造相似。焊剂化学成分的一致性及其沿焊丝全长分布的均匀性非常重要，焊丝表面的洁净并且不含多余的拉拔润滑剂也非常重要。虽然上述要求在药芯焊丝的早期制造中导致了一些问题，但更先进的制造技术以及在线质量监测[54]的引入现在已经能够确保药芯焊丝的质量得到保证。

4.5　本章小结

手工电弧焊，埋弧焊和气体保护焊的焊接材料一直在稳步提高中，开发出了高韧性、耐潮湿的低合金钢焊条，以及二氧化钛药皮增强操作性能的不锈钢焊条、埋弧焊中添加铁粉剂和 Ti-Bo 微合金化的焊丝，在气体保护焊中使用低残留的焊丝等新型焊接材料。新型焊接材料的应用是这一革命化进程中的典型代表。正如在第二章讨论中所介绍的，药芯焊丝电弧焊具有更广泛的应用前景。因此它的引入和开发对焊接材料进步的作用可能更显著。

第5章 先进焊接方法中的气体

5.1 引言

在最近发展起来的很多焊接方法中，保护气体是其中的一种重要消耗材料，例如：气体在钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊以及药芯焊丝气体保护焊方法中，作为主要的保护介质；在激光成形和激光焊接中，作为保护与等离子控制用气体。

5.2 弧焊过程中的保护气体

弧焊过程中保护气体的首要功能是对持续的低压电弧提供合适的介质以保证焊接过程的稳定，同时对电弧提供保护以免受到空气污染。第二个功能，包括焊缝几何形状与力学性能的控制与前者同样重要。

5.2.1 保护气体在电弧维持与稳定方面的作用

电离气体中的电流使电弧得以维持，这样气体电离的难易程度将影响起弧与维弧能力。气体电离的难易程度通过其电离电动势表征。常用气体的电离电动势见表5.1。特别是氩气，具有低电离电动势，通常用于钨极惰性气体保护焊。

表5.1 常用保护气体的特性

元　　素	电离电动势	密度/（$kg\ m^{-3}$）
氩气	15.75	1.784
氦气	24.58	0.178
氢气	13.59	0.083
氮气	14.54	1.161
氧气	13.61	1.326
CO_2	（14.0）	1.977

气体的热导率也会影响电弧稳定性，高热导率可能导致电弧中导电部分的直径减小，而这又会使电弧电压增高并降低电弧稳定性。氢气相比于氩气具有更低

的电离电动势和更高的热导率，与氩气混合时将提高电弧电压，因此当混合气体中氢气含量增加到8%（体积分数）以上时，可能会影响到电弧稳定性和起弧。

电弧坚挺通常被认为在小电流钨极惰性气体保护焊时是有利的。但当电流增加时，作用于熔池上的电弧压力也增加，这又容易导致焊穿。然而，研究证明[55]富氦混合气体会产生明显低得多的电弧力，这可能在大电流焊接时成为有利条件（如图5.1[56]）。在熔化极气体保护焊和药芯焊丝气体保护焊中，电弧稳定性很大程度上取决于熔滴过渡的模式。反过来，熔滴过渡模式又受到气体对熔池表面张力作用、材料功函数和相应的电弧底部行为等因素的影响。

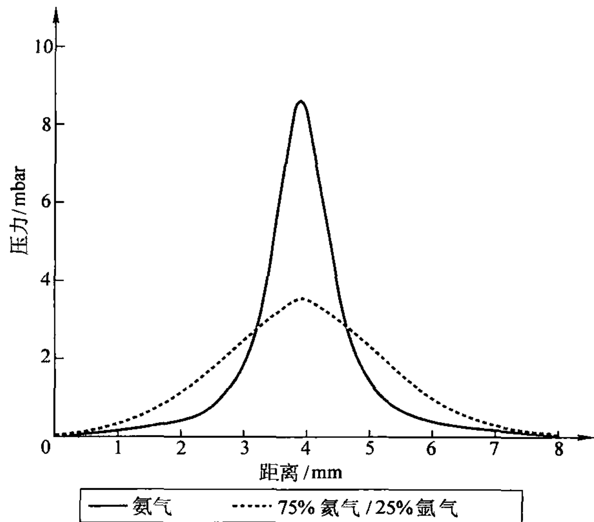


图5.1　钨极惰性气体保护焊（150A.3mm弧长）电弧压力分布

5.2.2　保护气体在避免气氛污染方面的防护作用

保护气体对气氛污染防护效果的有效性将由其化学活性和物理性能决定。在钨极惰性气体保护焊中，防止钨电极的氧化非常必要，因此，惰性气体氩气或氦气一般被用作保护气体。而对于熔化极气体保护焊和药芯焊丝气体保护焊，通常需要添加额外的氧化性气体以促进熔滴过渡，但这些气体对合金元素的烧损作用（金属熔滴在电弧中的氧化）则必须予以考虑。

保护焊缝金属避免产生不利的气体-金属间反应也是十分必要的，气体-金属间的反应可能产生气孔、夹杂、表面氧化及脆化等缺陷。常见的可能产生上述问题的活性气体有氧气、氮气、氢气。大部分材料在氧化性气氛中加热时会产生氧化；而氮气与某些可反应的金属（钛，铊，钒及铌）生成不可溶的氮化物，与其他金属（铁，锰，铬及钨）产生可溶的化合物；氢气可溶于大部分金属中，

且与可反应的金属间还会生成化合物。

氮气和氢气的平衡溶解度在大部分液态金属中很高，但在固态金属中却低很多，如图 5.2 所示[57]。如果液态金属中溶解的这些气体含量超过了其在固态中的溶解极限，则熔池凝固过程中气体将试图逸出液态金属，就会有产生气孔的倾向。在电弧焊接条件下，研究发现气体在熔池中的溶解量比在无电弧时熔化金属中的预期平衡溶解量高[58]，而且，对于氮气，其在钢铁中的溶解量还受到钢铁中合金元素含量以及氧和氮的分压的影响。这还特别有趣地表现在保护效率方面，因为氧气有增加氮气在金属中溶解量的趋势，因此，如最近的研究成果[59]所揭示的那样，空气对电弧气氛侵入的效果远远比单纯的氮在电弧气氛中作为杂质存在所产生的影响严重得多。

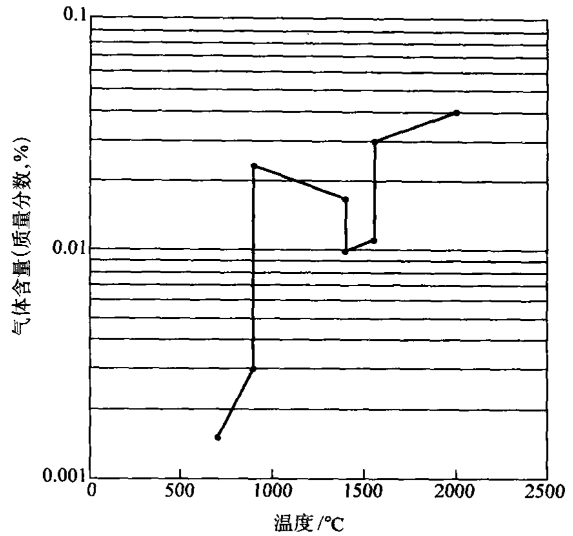


图 5.2 氮在铁中的平衡溶解度

使保护气保持层流并防止大气污染的能力将取决于气体的物理性质，特别是其密度、黏性及雷诺数。

常见保护气体与常见材料间的相容性见表 5.2。

表 5.2 保护气体与常见材料间的相容性

保护气体	相容的材料	易出现的问题
氩气及氦气	所有材料	无
含氧的混合气体	碳钢及合金含量不超过 8% 的不锈钢	活性金属（如钛）的脆化；氧化；焊缝成形差；某些材料中合金元素的烧损
二氧化碳	碳钢及低合金钢	在超低碳不锈钢中碳的聚集
氮气	铜	铁素体钢及镍合金中出现气孔；活性金属的脆化；低合金钢韧性的下降
氢气	奥氏体不锈钢及含镍量较高（不超过5%）的合金钢	铝合金及其他材料中的气孔；可硬化的铁素体钢中的氢诱导冷裂纹

5.2.3　保护气体的次级作用

保护气体的次级作用其重要性并不低于其首要作用，有时，对于特定的应用，选择最合适的气体可能起到决定作用。保护气体的几个重要次级作用包括控制金属的熔化特性和接头性能。

1. 熔化特性

保护气体对焊缝成形和熔化特性具有非常显著的影响（如图5.3所示），在相同的电流下，使用增加电弧能量的气体（如氦气、氢气、二氧化碳等）可以增加熔化区的总面积。

在熔化极气体保护焊中，纯氩气的使用会产生特征鲜明的“指状”或“酒杯状”熔深形状，而氩气/二氧化碳混合气体或氩气/氦气混合气体产生更接近圆形的熔深形状。

焊缝余高的形状也可以通过选用不同的保护气体得到改善，例如，氩气/二氧化碳混合气体通常会使余高轮廓更平整，相比于纯氩气做保护气体的焊缝，其抗疲劳载荷的能力得到增强，同时生产成本也得到降低（详见第七章）。

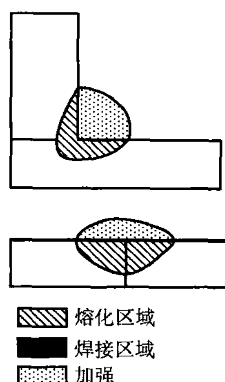


图5.3　角接头和对接熔化区形状（保护气体会影响熔合比、熔化区形状和加强高形状）

在有些情况下，混合的保护气体还能够提高熔化过程的稳定性和一致性。氩气/氢气混合气体对于防止奥氏体不锈钢在钨极氩弧焊时的偶然不稳定现象起到有益的作用（将在第六章中进一步讨论）。

2. 接头性能

焊接接头的力学性能将取决于缺陷率和最终的接头金属的组织，而这两点都受到保护气体的影响。气孔的控制可以通过选择合适的保护气体并确保焊接过程中有效的保护气氛一直得以维持来实现；熔合缺陷可以通过选择提供更高热输入的气体来将其减到最少；氧化物夹杂可以通过控制保护气氛中的氧分压得到有效控制。

焊接接头最终的微观组织也可能受到保护气体的影响，具体表现在保护气体对热输入和金属化学成分的影响上。例如，研究发现[60]，铁素体钢在熔化极气体保护焊时，增加保护气氛中的氧分压，添加不超过2%的氧或不超过15%的二氧化碳（气体含量为体积分数，后同），其接头韧性将得到提高，这一研究结果示于图5.4中。产生这一现象的原因被认为是由于提供了合适的微小溶质的数量和尺寸，促进了细晶针状铁素体的形核。然而，进一步增加保护气氛中的氧分

压，导致粗大的氧化物溶质的出现，这又使得焊缝金属韧性降低。保护气体的这些作用相对较小，同时还受到焊丝成分、维持稳定的焊接过程的能力等其他因素的影响。

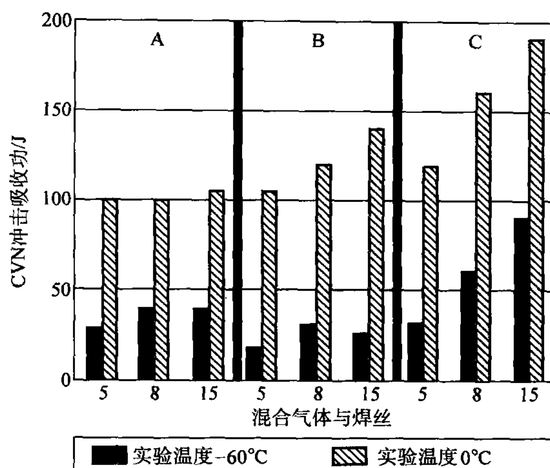


图 5.4 脉冲熔化极气体保护焊焊接低合金高强钢应用不同混合气体时的韧性
（A—70S6 焊丝；B—70S6 焊丝；C—K5Ni 焊丝；氩气中分别添加 5%、8% 和 15% 的 CO_2[60]）

5.2.4 保护气体的选择

保护气体的种类很多，但针对某特定条件应用的气体可选范围却受到能否满足前述标准的限制。常见气体及其特性分别说明如下：

1. 氩气

氩气是钨极惰性气体保护焊中最常用的保护气，其具有绝对的惰性，并且相比于空气其密度更高。氩气电离电动势较低，使得起弧和维弧更容易。

2. 氦气

氦气在化学上是惰性的，密度比空气小，在相同的电流和弧长条件下，比氩气需要的电压更高，相应地导致总能量的增加和热输入及熔化区面积的提高。然而氦气保护焊接通常对应着较小的深宽比。氦气的价格明显高于氩气，但很多时候使用氦气可以获得更高的焊接速度，特别是焊接高热导率材料时，使得其成为一个较好的选择。

3. 二氧化碳

二氧化碳具有化学活性，密度比空气高。二氧化碳在电弧中发生分解并释放出氧气和一氧化碳，这会导致焊缝金属中一些微量元素如硅、锰、钛等的减少和碳含量的增加。由于二氧化碳的化学活性，其应用被限制于钢铁材料的熔化极气

体保护焊。在相同的电流和电弧长度条件下，纯二氧化碳的电弧电压较以氩气为主的混合气体的电弧电压高1～2V，相应地热输入也略高，导致熔化区增大。二氧化碳做保护气体时，熔滴过渡特性、工艺范围和操作范围以及电弧稳定性都较差，特别是大电流焊接时这一缺陷更明显。

4. 氧气

氧气不作为保护介质单独使用，但在很多混合气体组合中是一种重要的组分。当在氩气中加入氧气时，能够提高电弧稳定性，减小钢铁材料的表面张力，并提高电弧端部的特性，降低了的金属材料表面张力会改善熔滴过渡和焊缝表面成形。和二氧化碳相同，氧气的使用会破坏活性更高的合金元素的恢复情况。

5. 氢气

氢气与氩气混合时增加电弧电压和热输入。氢气的使用经常被限制于钨极气体保护焊和等离子弧焊两种方法中，并且仅限于氢气存在时不发生任何不利的化学反应和物理反应的材料。氢气化学性能的特点使其应用于不锈钢焊接时优点更为突出，能够改善润湿铺展性从而提高焊缝表面成形及光整程度。

5.2.5　特殊应用中的混合保护气体

通过分析每种气体的不同作用，使得制造混合气体以满足大部分材料-焊接方法组合的要求成为可能。可以获得的一系列混合气体的组分及性能，在本节将有详尽的描述。

1. 用于低碳钢和低合金钢熔化极气体保护焊的混合气体

二氧化碳可以用于熔化极气体保护焊过程中的短路过渡，但以氩气为主，添加氧气或二氧化碳的混合气体，能够提供更好的电弧稳定性，减少飞溅，并具有更广的焊接参数范围（例如电压、送丝速度以及导电装置等的严格程度都有所降低）。另外，混合气体的应用也会使焊缝表面轮廓和形貌得到改善，节省了焊缝金属和焊接时间。工业上能够获得的相应混合气体通常属于下列某一种混合气体。

1）氩气加1%～8%的氧气。

2）氩气加1%～8%的二氧化碳。

3）氩气加8%～15%的二氧化碳。

4）氩气加15%～25%的二氧化碳。

5）纯二氧化碳。

6）氩气/二氧化碳/氧气混合。

纯氩气并不适于熔化极气体保护焊，因为其焊接电弧不稳定，而且相应的焊缝表面轮廓也不规则。氩气中添加不超过1%的氧气对提高电弧稳定性有非常显著的作用，但焊缝表面的加强高通常会过高，而且断面熔深也呈现葡萄酒杯状。

含1% ~2%氧气的混合气体可以用于脉冲喷射过渡的熔化极气体保护焊，并且具有非常好的电弧稳定性。氧气的加入，并未改善断面熔深的形状。更高的氧气含量，但最高不超过8%，可以用于薄板短路过渡焊接。当含氧气超过8%时，焊缝表面的氧化状态将超过容许标准。

氩气中加入不超过8%的二氧化碳使操作过程稳定并轻微地提高焊缝表面成形，虽然其酒杯状断面熔深仍然非常显著。包含大约含5%二氧化碳的混合气体可以提供平稳的喷射过渡及脉冲过渡，用于短路过渡时飞溅更低。这种混合气体最适于薄板焊接、中厚板全位置焊时的短路过渡以及大电流焊接时的向下立焊和水平-垂直相交的角焊缝。这类低氧气或低二氧化碳含量的混合气体应用在中、厚板材料的多层焊方面受到限制，因为在这些条件下会零星地出现交互的细小的气孔。产生这种现象的原因被归结于氩气的被诱捕及氮气的吸收[61]，现在人们知道可以通过增加焊接电流或提高二氧化碳在混合气体中的含量来降低气孔率。

中等程度二氧化碳含量（氩气中加入8% ~15%的二氧化碳）的混合气体在喷射过渡或脉冲过渡焊接时能够降低产生气孔的风险，提高熔化率并仍然保持好的操作特性。

氩气中添加15% ~25%二氧化碳的混合气体具有的显著特征是增加了熔化率并具有碗形熔深断面形状，但当二氧化碳含量接近25%时电弧稳定性有下降的趋势。这类混合气体适于焊接厚板结构及多层多道对接焊。当二氧化碳含量超过25% ~35%时，混合气体的特性变得和纯二氧化碳焊相似。

纯二氧化碳提供良好的熔化特性，但焊缝余高较采用富氩气体时更高。电弧的热输入量得到提高，而这可以在焊接优质板材时提供稍好的表现。虽然纯二氧化碳焊接时可以得到令人满意的短路过渡，但其焊接参数区间比富氩气体时更窄，同时在喷射过渡和脉冲过渡时其熔滴更接近圆形，而且飞溅也更加显著[62]。图5.5中列出了采用二氧化碳和氩气/二氧化碳混合气体时飞溅水平的对比。

三元混合气体氩气/二氧化碳/氧气具有与氩气/二氧化碳相似的性能特点，但获得了略微提高的电弧稳定性。采用这类三元混合气体焊接时，在熔滴过渡状态下测量的电弧稳定性结果列于图5.6中，从图中可以看出，含12% ~15%的二氧化碳和2% ~3%的氧气时的混合气体，具有最优异的电弧稳定性。在此范围内的混合气体，即使在焊条接负极时，仍提供了良好的喷射过渡表现及熔化特性。

2. 用于奥氏体不锈钢熔化极气体保护焊的混合气体

不锈钢可以采用氩气添加少量的氧气（1% ~2%）并采用喷射过渡模式焊接。但是，如果用同样的混合气体进行短路过渡焊接，焊缝形貌和熔化特性都趋于变得很差。氩气添加5%的二氧化碳混合气体，可以用于焊接奥氏体不锈钢，但焊缝中的碳含量会升高至超过0.04%（未加说明的金属成分为质量分数，后

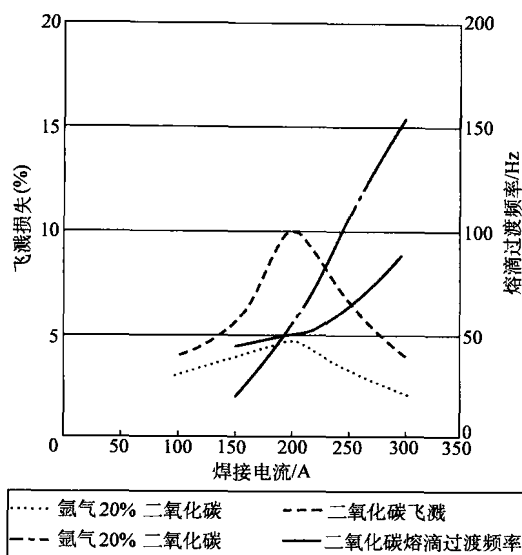


图5.5　二氧化碳与氩气/20%二氧化碳保护时飞溅损失的对比（熔化极气体保护焊，1.2mm焊丝）[62]

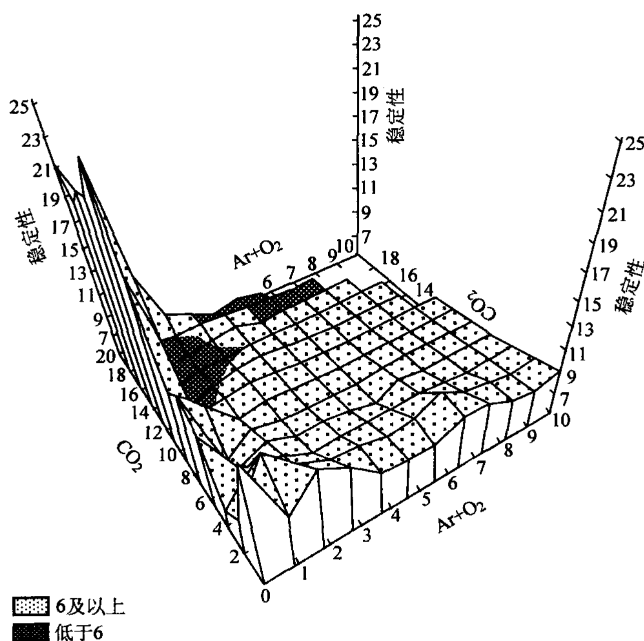


图5.6　采用氩气/二氧化碳/氧气混合气体保护焊熔滴过滤时的电弧稳定性（稳定性是通过测量燃弧时间的标准差获得的，标准差的值低代表电弧稳定性好）

同），使得这类混合气体不适于低碳含量“L”级不锈钢的焊接。

在氩气/二氧化碳混合气体中加入氦气可以改善熔化特性，降低润湿角并获得更理想的焊缝形貌。此外还有一些混合气体专利，以氩气、氦气和二氧化碳混合气体为主，某些条件下还添加少量的氧气或氢气。

用于不锈钢熔化极气体保护焊的混合气体通常可以归为高氦含量（氦气占60% ~80%）和低氦含量（20% ~40%）两种。

高氦含量混合气体主要用于短路过渡，这时较高的氦含量提高了焊接速度，改善了焊缝成形，同时增加了短路过渡的频率，电弧电压得到提高，相应地熔化过程也得到改善，特别是在小电流焊接时尤为明显。

低氦含量混合气体主要用于喷射过渡和脉冲过渡焊接，这类气体提供了平稳的喷射过渡，良好的熔化过程和优异的焊缝成形。在这类气体中添加1% ~2%的氢气能够改善润湿性和焊缝形貌，因为氢的添加从化学角度减少了表面氧化。

虽然这些混合气体主要为奥氏体不锈钢的焊接而开发，但当需要更高的焊接速度和更理想的焊缝表面形貌时（例如钢铁材料薄板部件的自动焊），它们同样可以用于普通碳钢的焊接。

3. 钢铁材料钨极氩弧焊用气体

氩气是钨极氩弧焊时应用最广泛的气体。然而氩气加入不超过5%氢气的混合气体也经常用于钨极氩弧焊，主要是奥氏体不锈钢的焊接，特别是当需要更高的焊接速度，改善焊缝成形，更广的焊接参数范围时。焊接铁素体钢时不能在保护气体中添加氢气，因为其对氢致冷裂纹很敏感。

含30% ~80%氦气的氦/氩混合气体可以用于钢铁材料钨极氩弧焊的高速焊接，并且，对于奥氏体不锈钢，氦/氩混合气体和氩/氢混合气体都能够提高焊接时的工艺裕度，这有利于解决偶然性因素导致的焊接问题[64]。

4. 铝合金熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊用气体

虽然不超过80%氦气的氩/氦混合气体可以提供更理想的熔化特性及焊缝表面成形[65,66]，铝及其合金不论采用熔化极气体保护焊还是钨极氩弧焊通常仍推荐使用氩气作为保护气体。氩/氦混合气体在焊接铝合金时通常用于厚板焊接，这时能够在一定程度上减少坡口准备和焊缝道数。

5. 铜及其合金熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊用气体

对于像铜及其合金一类的高热导率材料，需要电弧提供更高的热输入，特别是在钨极氩弧焊时。氦气或氦气/氩气混合气体增加了必要的热输入，减少了焊前预热的需要，并且（或者）提高了焊接速度，增大了焊接参数区间。氮气及氮气/氩气混合气体也曾用于铜及其合金的熔化极气体保护焊，氮气增加了热输入，但熔滴过渡情况较差，并且飞溅水平很高。

6. 镍及其合金熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊用气体

氩气或氩气/氦气混合气体可以用于各种镍基合金的焊接。高镍合金对氮气气孔很敏感，但少量添加氢气（1% ~5%）能够提高熔池金属的流动性并减少气孔。氩气/氢气混合气体经常用于铜镍合金如蒙耐尔合金（w(Ni)66%，w(Cu)31%）等钨极氩弧焊的保护气体。

7. 等离子弧焊用气体

在等离子弧焊中，需要提供两类气体：等离子弧气体和保护气体。对很多应用而言，最适合的等离子弧气体是氩气，它能够保证可靠起弧，并保护钨电极和阳极孔免于腐蚀。保护气体可以是氩气，当然，对于奥氏体不锈钢，添加不超过8%的氢气能够增加电弧挺度，改善熔化特性并提高焊接速度。

8. 钢铁材料药芯焊丝焊接用气体

药芯焊丝电弧焊接过程中需要的保护气体种类，取决于所用焊接材料的类型，包括：适用于钛钙型及碱性药芯焊丝焊接碳钢及低合金钢的保护气体、适用于金属粉末药芯焊丝焊接碳钢及低合金钢的保护气体和适用于药芯焊丝焊接不锈钢的保护气体。

大部分钛钙型及碱性药芯焊丝都经过特殊的成分设计，以在二氧化碳气体保护条件下能够提供良好的操作特性和接头力学性能。氩气加20%的二氧化碳混合气体及三组元氩气/12% ~15%的二氧化碳/2% ~3%的氧气混合气体通常会轻微地提高电弧稳定性并提高易氧化的合金元素的恢复。

金属粉末药芯焊丝最早设计为在氩气加5%的二氧化碳混合气体保护时提供平稳的喷射过渡，但前述三组元混合气体氩气/氧气/二氧化碳可以提供优异的过渡特性并略微提高熔化特性。可以在二氧化碳保护条件下令人满意地操作的金属粉末药芯焊丝也已经见诸介绍。

大部分不锈钢药芯焊丝设计为在氩气加20%的二氧化碳混合气体保护下操作，但前述介绍的三组元混合气体也被证明可以获得满意的结果。近期研究工作[67]已经表明，使用较低二氧化碳含量的氩气/二氧化碳混合气体提高合金元素的恢复，可以降低焊缝金属中的氧含量，提高接头拉伸时的屈服强度和抗拉强度。正如碳钢实芯焊丝焊接过程一样，采用特定的混合气体获得了最优的接头韧性，这主要由于焊缝化学成分的调整以及保护气体对焊接热循环的作用两者共同作用的结果。

使用药芯焊丝焊接时，药芯成分的设定基本决定了所需保护气体的种类，保护气体组分可以在一定范围内变化，确保在预定混合气体组分产生可能的偏差时，不会影响操作特性和焊缝性能是非常重要的。

9. 磁控电弧对接焊中所用的气体

磁控电弧对接焊可以在不使用保护气体的条件下使用，但也有报道指出使用

二氧化碳保护气体能够在一定程度上提高接头质量[68]。

10. 特种混合气体

有一些专门开发的特种混合气体用于特殊场合，例如：氩气/氯气，氩气/氟利昂混合气体、氩气/二氧化硫混合气体、氩气/一氧化氮混合气体和用于高熔敷速率的熔化极气体保护焊用气体。

1）氯气及氟利昂（氟利昂是碳、氯、氟、溴等元素的气态化合物，例如：氟利昂 12 是 CCl_2F_2）：为减小铝合金熔化极气体保护焊气孔率并提高工艺裕度而对氩气/氯气混合气体开展了研究[69]，虽然报道中称该方法能够取得一定的效果，但由于氯气极强的毒性而使得其并不可靠。

某些氩气/氟利昂混合气体是无毒的，同时研究[70]还发现可以采用氟利昂代替氯气取得了相同的效果，特别是电弧稳定性和焊缝表面几何形貌还有明显改善。然而，虽然某些氩气/氟利昂无毒，但其工业化应用却受到了环境保护因素的制约。

虽然这两组混合气体的应用分别受到了不同的限制，但在全封闭且环境得到控制的独立空间内，采用全自动焊接时，它们仍有可能得到应用。

2）二氧化硫：氩气/二氧化硫混合气体已经用于[71]减少钨极氩弧焊接不锈钢时偶然性因素的影响。虽然这些实验显示硫对于这些材料的焊接性具有一些人们渴望获得的结果，但气体的毒性限制了其实际应用。

3）一氧化氮：一系列包含少量一氧化氮的气体混合物已经被开发出来作为控制钨极气体保护焊和熔化极气体保护焊电弧周围臭氧水平的一种措施[72]。臭氧是由于弧光中的紫外线对电弧附近及周围空气中的氧的强烈辐照作用产生的，波长在 130 ~ 170nm 范围内的辐照作用对于促进臭氧的形成尤其有效[73]。臭氧是有毒的，而且其在焊工呼吸区域的推荐最大允许值非常低。幸运的是，臭氧易于和空气中的其他气体与物质发生反应生成氧气和氧化物，并且，在小电流或合理数量的烟尘存在时，臭氧生成的速率较低，在达到焊工呼吸区域之前发生反应的可能性很高。然而，在某些特定的应用条件下，如采用大电流钨极惰性气体保护焊，特别是熔化极气体保护焊焊接铝合金时，会产生大量的臭氧。这时，如果一氧化氮（其毒性明显低于臭氧）添加到保护气体中，它将会与自由态的臭氧发生反应生成氧气和二氧化氮，降低臭氧的数量。

研究表明，在氩气加 20% 的二氧化碳混合气体中添加 0.03% 的一氧化氮，就能够在采用熔化极气体保护焊焊接钢时显著降低臭氧的生成[74,75]，如图 5.7 所示。研究还表明，这一方法在采用熔化极气体保护焊和钨极惰性气体保护焊焊接铝合金时，对臭氧的控制也是有效的。这些混合气体的使用通常还建议与局部通风共同使用以确保去除焊接环境中的各种有毒气体。

4）高熔敷速率焊接时的混合气体：前面已经讨论过，采用直流反接并辅以

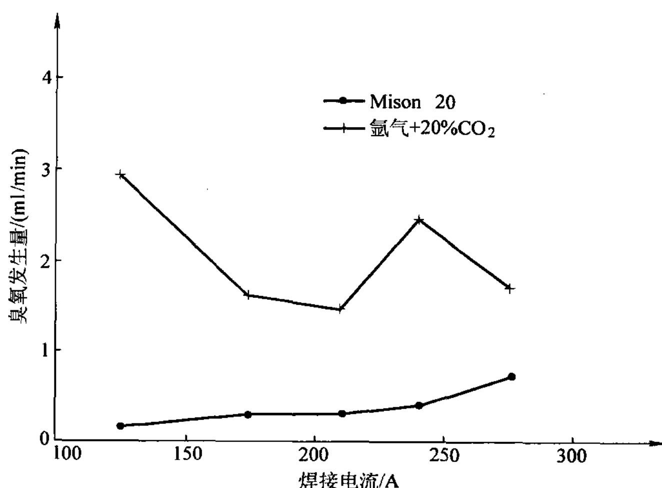


图5.7　采用熔化极气体保护焊焊接钢时添加一氧化氮对臭氧形成的影响（MISON 20 的成分：氩气 +20% 的二氧化碳 +0.03%（最高含量）一氧化氮）（［74］Courtesy AGA.）

氩气/氧气/二氧化碳混合气体能够获得高熔敷速率。此外，研究人员还开发出特殊的混合气体，当同时采用延长的干伸长时，可以获得非常高的熔敷速率（可达 15kg/h）。这些混合气体的基本成分是氩气、氦气和二氧化碳，主要应用于自动化焊接过程。这时需要设计特殊的焊枪以确保能够对增加了的焊丝干伸长提供足够的保护[76]。

5.3　激光焊用保护气体

激光焊过程中需要气体用于辅助激光产生、提供保护以及等离子弧控制。在气体（二氧化碳）激光器中，采用混合气体以维持放电并形成激光束。具体的混合气体组分决定于激光器的种类和制造厂家，典型的混合气体为[77]：80% 的氦气/15% 的氮气/5% 的二氧化碳、61% 的氦气/4% 的二氧化碳/31.5% 的氮气/3.5% 的氧气。

供应气体所采用的方式（例如：分离的或预先混合的）也将决定于应用的气体激光器的种类。然而，不论是对于气体激光器还是固体（YAG）激光器，都需要额外的气体用于提供保护和控制等离子弧。

对于保护作用而言，使用的气体与钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊中所采用的气体相似，但在激光焊中，不希望产生由于气体和金属蒸汽离子化而形成的等离子体（详见第8章），因此倾向于使用等离子化势能高的气体，如氦气等。起保护作用的常用混合气体为：

氩气，氦气及氩气/氦气混合气体，通常用于大部分结构材料，既包括钢铁，也包括活性较大的材料如钛及其合金、锆合金等。

氮气，保护要求不高时，也可以采用氮气保护，如用于奥氏体不锈钢的焊接等。

激光焊中如果确实形成了等离子体，可以采用喷射气体代替或扰动等离子体[78]，这时常用的气体为氦气。

5.4 本章小结

电弧焊和激光焊过程中可用于保护的气体种类是有限的，但可以使用包含2~4种活性组分的混合气体，以获得最佳的焊接效果。常见保护气体的种类及其应用总结于表5.3中。

表5.3 用于电弧焊的常见保护气体

气　体	应　用	特　点
氩气	钨极气体保护焊中用于所有金属，熔化极气体保护焊中（喷射过渡和短路过渡）用于铝、镍、铜等	惰性气体，特别适于钨极气体保护焊，良好的起弧性能和稳弧性能，有效的保护作用，低成本，在熔化极保护焊焊接钢时焊缝成形很差
氦气	钨极气体保护焊中用于所有金属，特别是铜、铝等；熔化极气体保护焊中铝合金大电流喷射过渡	惰性气体，高的热输入量，比氩气的电压更高，可以改善熔化区，低的电弧压力，为实现有效保护需要更大的气流量
氩气+25%~80%的氦气	铝和铜的钨极气体保护焊和熔化极气体保护焊	惰性气体，可以改善熔化区和焊缝表面形貌，良好的保护效果，稳定的电弧
氩气+0.5%~15%的氢气	奥氏体不锈钢及铜/镍合金等的钨极气体保护焊	活性气体，改善熔化区形状和边缘润湿性，减少氧化物
二氧化碳	低碳钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，短路过渡，药芯焊丝电弧焊	活性气体，低成本，良好的熔化区形状，良好的保护效果，可能会使焊接过程稳定性变差，明显的飞溅
氩气+1%~7%的二氧化碳+不超过3%的氧气	低碳钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，喷射过渡或脉冲过渡	活性气体，低热输入，稳定的熔滴过渡，指状熔深

（续）

气体	应用	特点
氩气+8%～15%的二氧化碳+不超过4%的氧气	低碳钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，短路过渡或脉冲过渡	活性气体，良好的稳弧性能，改善熔化区形状和焊缝表面形貌
氩气+16%～25%的二氧化碳	低碳钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，短路过渡；药芯焊丝电弧焊	活性气体，熔化区增大但稳定性降低，飞溅增加
氩气+1%～8%的氧气	低碳钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，短路过渡，喷射过渡及脉冲过渡	活性气体，采用喷射和脉冲过渡时降低氧含量。降低不锈钢焊缝中碳的偏析
氦气+10%～20%的氩气+二氧化碳+氧气	奥氏体不锈钢熔化极气体保护焊，短路过渡	活性气体，熔化区增大，焊缝形貌得到改善
氦气+30%～40%的氩气+二氧化碳+氧气	不锈钢和低合金钢的熔化极气体保护焊，短路过渡，喷射过渡，脉冲过渡	活性气体，良好的熔化区形貌，可用于熔化极气体保护焊高熔敷速率的焊接并能够增大熔化区

混合气体的选择对最终焊缝的质量和经济性都有显著的影响。使用混合气体成本的评估必须综合考虑其本身的高成本和焊接全过程的成本，如第二章所讨论的。

第 6 章　先进的钨极气体保护焊

6.1　引言

钨极气体保护焊作为一种高质量熔焊技术已经日趋成熟。这一方法的发展趋势在于扩展其潜在应用范围并提供更完善的过程控制。

6.2　钨极气体保护焊的发展

钨极气体保护焊的一些显著优点在下文中进行介绍，而在自动化技术、计算机控制技术及自适应控制技术等方面更进一步的发展将在第 11 章中讨论。

钨极气体保护焊焊接过程控制相关的基本原理和进展将围绕下列方面进行讨论：

1）电弧起弧与电极材料进展。
2）脉冲钨极气体保护焊和高频脉冲钨极气体保护焊。
3）交流方波钨极气体保护焊与等离子弧。
4）钨极气体保护焊过程中的冷添丝和热添丝。
5）双气体钨极气体保护焊和等离子弧焊接。
6）多阴极钨极气体保护焊。
7）活性焊剂钨极惰性气体保护焊。
8）潜弧钨极气体保护焊。
9）大电流的钨极气体保护焊。
10）钨极气体保护焊及相关过程的控制。

6.2.1　电弧起弧

钨极气体保护焊起弧过程包括两个阶段：起始引弧实现气隙间的电击穿（阶段 1），稳弧主要指焊接过程中维持平稳的电弧（阶段 2）。

阶段 1 主要受电极、电源系统开路电压及引弧方法等影响，阶段 2 主要受电源响应速率的影响。

起始引弧可以通过下列方法之一实现：

1）接触引弧。

2）直流高压引弧。

3）高频高压引弧。

如下文中将要讨论的，这些方法都有自身的局限性，使得研究者开发了新的引弧系统，也将在文中描述。

1. 接触引弧

接触引弧可能是现有方法中最简单的：将钨电极与被焊工件接触然后快速回抽。钨电极在与工件接触过程中，电源正负两极间被短路并产生短路电流，钨电极通过接触电阻被加热，被加热的电极快速回抽过程中建立了初始电弧。在电极与工件脱离的瞬间，电极与工件间的间隙内会存在金属蒸汽，形成了很短的电弧。这一非常短的电弧帮助接触引弧过程得以完成。接触引弧的有效性很大程度上取决于操作者的技能。但不论操作者技能如何，接触引弧都会对钨电极产生污染，而这不可避免地会影响电极的使用性能及焊接质量。

2. 直流高压引弧

研究表明，为了在正常弧长时能够通过直流稳定地引弧，其直流电压需要10 kV[79]，这样的高电压具有非常严重的安全威胁，并且在常规应用中也无法获得。使用短时高压浪涌表明可以降低致死的电击风险[80]，但仍然无法避免偶然接触到如此高的脉冲电压时可能产生的伤害风险。因此，直流高压引弧方法严格限制于自动化焊接系统中，这时操作者受到隔离保护而不会接触到高电压。

3. 高频高压引弧

高频电流具有在导体外层传导的趋势，这种“集肤”效应可以被利用在钨极气体保护焊的引弧系统中。高频高压电源（如3kV，5MHz）可以有效地击穿电弧间隙并且不会对操作者造成伤害。这类系统广泛地应用于钨极气体保护焊中的起弧和交流电弧的维弧过程中，并将继续作为手工钨极气体保护焊系统中主要引弧方法。在某些条件下，使用高频引弧系统表现出不稳定性，这可能是由于电极几何形状特性或焊接电源与起弧系统中相位关系不匹配（如未实现同步）等原因引起的，有些条件下这种不稳定性是高频引弧在电极及导嘴端部产生负电荷积聚导致的。在最后一种不稳定因素中，可以通过连接导嘴与电源正极性端使积聚的负电荷释放得到解决，从而提高起弧稳定性。当焊枪使用陶瓷喷嘴时，可以在喷嘴外缠绕导体制成的薄片以保证导电性；当使用金属喷嘴时，需要在喷嘴和电源正极间接入电阻。

然而，使用高频引弧技术的主要问题在于使用高频振荡电压。高频振荡电压随着采用的振荡回路的不同，会覆盖很大范围的无线电频段，并产生经由空气或电源传播的干扰。在过去，这种干扰会影响到通信系统、室内电视和收音机的接收，而且也会对处于焊接环境中的电子控制系统和计算机系统产生干扰。

4. 新的引弧技术

程控接触引弧。传统接触引弧技术的主要问题是过高的短路电流导致电极的过热，从而增加电极污染的风险。这一问题可以通过控制短路过程中的电流得以克服。目前存在多种不同的相应系统[81]，但其控制过程基本如下（也可参考图6.1）：闭合焊炬开关后（A），通过限流电阻在焊枪电极与被焊工件间施加一低电压，当电极接触到被焊工件（B），可以检测到短路回路的建立，这时通以2～10A的小电流，这个小电流足以使电极预热但不会导致过热（C），当电极抬起的过程中，电压也随之升高（D），以这一电压变化触发电源系统开启主供电回路。起弧电流可以通过程序控制，使其在转换到工作值前快速上升到高水平，以保证电弧稳定性。试验表明[82]，采用这类系统反复起弧后，仍未检测到电极污染或电极质量减少。这类系统也适用于自动化焊接系统，这时电极与被焊工件间的接触与抽离都可以机械化完成（见第11章）。

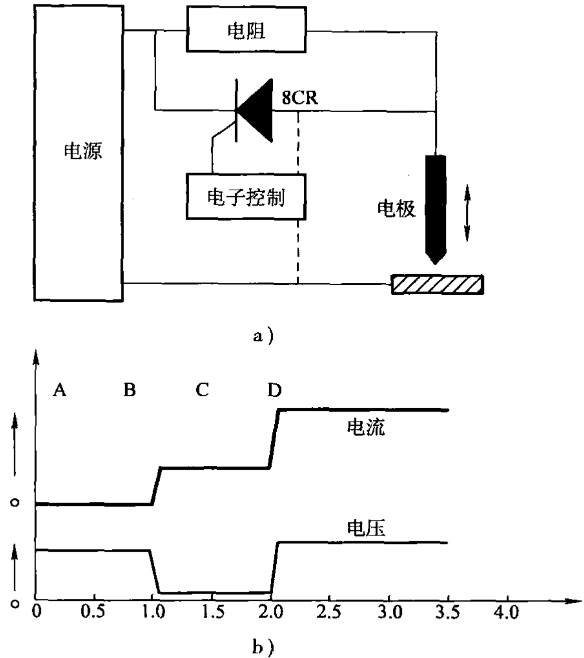


图6.1 钨极惰性气体保护焊程控起弧系统

a）简化的电路原理图 b）程控起弧过程中电源和电压

引导电极引弧。在焊枪中增加一个辅助电极可以使得主电弧引燃前能够产生小电流的引导电弧，这一系统可以实现稳定地引弧，当然需要复杂程度略微增加的焊枪。

压电引弧。压电引弧装置已有人研究[83]，结果表明：安装于焊枪上的压电

装置可以成功应用于钨极气体保护焊的引弧。然而该方法仍存在高电压泄漏等问题，因此尚未开发出可商业化应用的产品。

5. 稳弧

稳弧是起弧过程中的第二个阶段，稳弧过程主要取决于电源能够向引弧后的原始电弧提供的电流增加速度。在合理地设置电源参数并且相位关系合适的情况下，传统钨极气体保护焊电源能够提供 $10^4 As^{-1}$ 的电流增加速度。当然在各项参数设置并非最优的条件下，电流增加速度大幅降低的情况也会发生，特别是使用单相电源时，引弧相位与主电源相位不匹配条件下这种电流增速大幅降低的现象更为明显。可以预期，这样的电流增加速度条件会使得电弧击穿过程变得困难，特别是当电流设置值较低并使用较长的具有电感特性的电缆时，击穿过程将尤为困难。在这种条件下，能否有效地起弧，经常决定于和电源输出并联的外加电容器。外加电容器可以在稳弧过程中对电弧放电。

电子控制的焊接电源，例如第3章中描述的晶体管串联调节器与逆变装置等，有能力提供更高的初始电流上升速度（$5\times10^4 As^{-1}$），并且对于相位差的敏感性也低很多。

6.2.2 电极材料的进展

1. 电极材料的化学组分

钨极气体保护焊中的钨电极，通常添加少量的氧化钍或氧化锆以改善起弧性能，其原因在于能够减少钨的功函数并提高其电子发射特性（纯钨的功函数大约为4.54eV，添加2%的氧化钍钨，电极的功函数大约为2.63eV）。

添加氧化钍的钨电极具有非常出色的起弧性能和直流操作特性。但研究表明，电极性能的稳定性与电极材料的同质性密切相关，特别是氧化钍分布的均匀性[85]。在这一研究中，采用添加细密均匀分布的氧化钍的钨电极，取代氧化钍分布不规则的钨电极，电弧稳定焊接时间（连续焊接操作）提高了100%，从原来的35h稳定焊接时间提高到70h，其工作电流均为125A。在电弧稳定焊接时间提高的同时，采用氧化钍均匀分布的电极后再引弧，延误也从原来的4%降低到1%。

虽然氧化钍对于提高起弧性能和保持钨电极形状都有较好的作用，但其具有辐射性。考虑到潜在的应用安全性，特别是电极制造行业，已经开展了尝试替代性合金化的研究。稀土元素镧、钇、铈等的氧化物也能够提供与氧化钍相似的功能。实验室研究表明[86]，掺杂上述替代组分的钨电极有时具有比传统的钍钨电极更优越的性能。在这些测试中，对采用高频引弧匹配18~36V直流焊接电压条件下的引弧成功性能进行了评价，结果在图6.2和下文中进行了归纳。

引弧后电流设定为20~30A，电极倾角为45°，每个不同的直流焊接电压值下起弧次数均为30次。在30V直流电压条件下，分别掺杂 ThO_2，La_2O_3，CeO_2

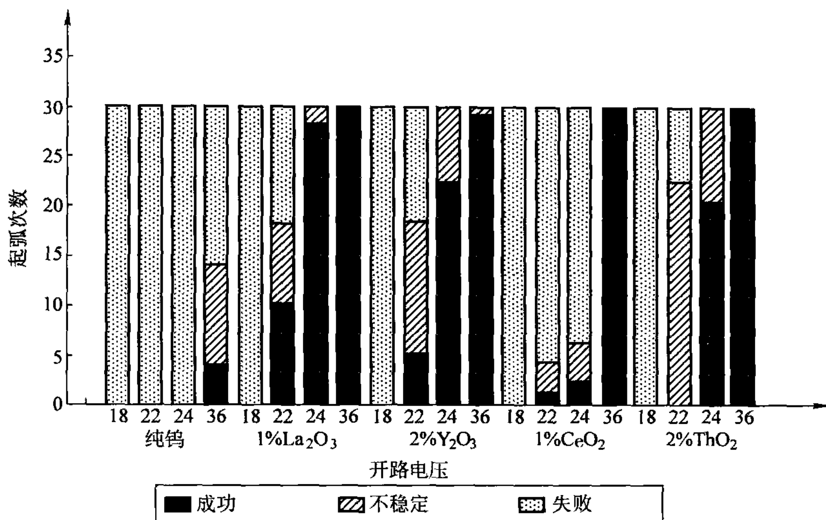


图 6.2 钨极惰性气体保护焊电极添加不同稀土元素时的电极性能（起弧次数和开路电压间的关系）

和 Y_2O_3 的钨极的起弧性能相当，但在 24V 直流工作电压下，掺杂镧的氧化物的电极具有最优的表现，同时对电极温度的测量结果表明，相比与纯钨电极和掺杂氧化锆的电极，掺杂 La_2O_3，CeO_2 和 Y_2O_3 的电极可以提供更低的电极温度，相应地，其电极烧损和尖端形状恶化等问题更不明显。

2. 电极尖端形状与重量损失

钨电极端部一般会形成“胡须”状，特别是当保护气体中氧气的含量超过 0.05% 时，人们认为这种形状的产生主要是钨的氧化物的挥发以及离电极端部较远距离处温度较低部分钨的晶粒长大等因素导致。“胡须”状电极尖端会导致电弧的非对称性以及电弧燃烧不稳定。虽然掺杂稀土氧化物的钨电极重量损失更少，但钨中合金元素的添加和掺杂对“胡须”状端部的形成并没有直接的影响。稀土元素掺杂的钨电极在电极使用寿命和起弧性能等方面的优越性并不显著，但是，以自动化焊接为代表的焊接过程，对可靠性和稳定性都有较高的要求，稀土元素掺杂的电极在这些方面被证明具有明显的优越性。在焊接过程一致性要求很高的条件下，采用钍钨电极是另一个可供选择的方案。

6.3 各种钨极气体保护焊方法

6.3.1 脉冲钨极气体保护焊

钨极气体保护焊中采用低频（1 ~ 10Hz）电流模式已经得到应用[87]，主要

目的在于获得如下特性：

1）更小的焊接变形。

2）针对不同厚度的材料提供更广的裕度。

3）针对不同种类的材料提供更广的裕度。

4）降低热量累积。

5）提高针对偶然性因素的裕度。

虽然在实际应用中经常使用如图6.3所示的交流方波脉冲电流，但对于电子电路组成的焊接电源，可以提供一系列的交流脉冲波形。低电流，或基值电流，通常设定为某特定的值，这一电流水平足以维持电弧的燃烧，但不会导致明显的被焊材料熔化。理想的脉冲电流水平决定于被焊材料的热学性能[88]，所使用的电流值应能保证焊接熔池以足够快的速度扩展，从而保证获得最大的热效率。

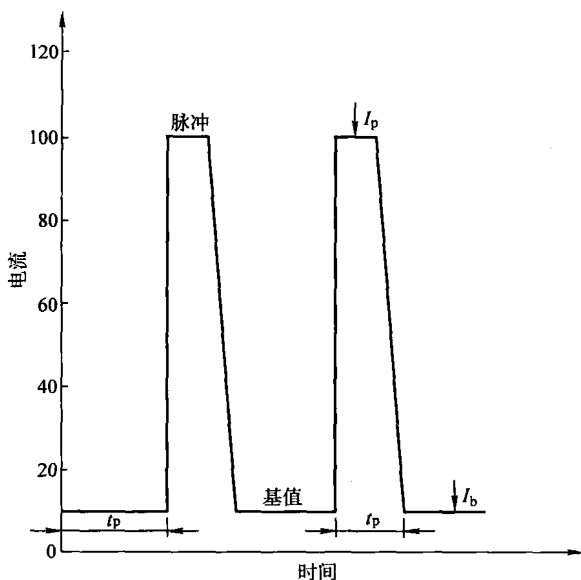


图6.3　典型的钨极惰性气体保护焊脉冲波形：电流随时间变化

表6.1指导性地列出了针对一系列不同材料所应采用的最佳电流值。脉冲作用时间决定于被焊材料的厚度，而当脉冲电流值超过表6.1给出的推荐值时，应采用式（6.1）辅助判断，

$$I_p t_p = K \tag{6.1}$$

其中，I_p 是脉冲电流，t_p 是脉冲时间，K 为常数。基值电流作用时间的调整原则是允许两个脉冲间隔下的焊缝金属凝固，这样所需要的时间还会和焊接速度相关。

脉冲钨极气体保护焊方法广泛地应用于具有相应需求的领域，如低温膨胀风箱中奥氏体不锈钢的焊接、核电站管道的焊接、航空发动机部件中镍基超合金（尼孟合金）的焊接等。

表 6.1 脉冲钨极氩弧焊的操作参数

材　料	脉冲电流/A
纯镍	250 ~ 300
不锈钢	150 ~ 200
铜镍合金	150 ~ 200
低碳钢	100 ~ 150
尼孟合金	50 ~ 80

6.3.2 高频脉冲钨极气体保护焊

已出现的高频（大于 5000Hz）脉冲钨极气体保护焊以提高电弧挺度，提供较高的热源能量密度和效率[89]以及实现更高的焊接速度。据称在小的平均电流，高频范围在 5 ~ 20kHz 之间时，电弧挺度改善的效果最明显。电弧挺度的提高可能与高的脉冲电流峰值有关。高频脉冲过程中，较高的脉冲峰值电流和极低的脉冲基值电流综合作用，允许出现较低的平均电流。当平均电流相对较高时，高频脉冲使得对烧穿现象的抵抗能力增强，这在机械化焊接应用中允许的最大焊接速度得到提高。

6.3.3 交流方波与可变极性钨极气体保护焊

被广泛认可的铝及其合金的焊接方法是交流钨极气体保护焊。然而，电弧本身具有自整流作用，这就需要抑制电流中的直流分量，同时还需要在电流过零的瞬间为电弧提供某种形式的再引燃。开路电压的上限允许值以及高频高压单元产生的电磁辐射干扰，使得对传统钨极气体保护焊设备进行设计以克服上述问题变得非常困难，并且成本高昂。

第 3 章中讨论的电源技术的进步，使得产生可变极性方形波形代替传统 sin 函数波形成为可能[33,90,91]，可变交流方波对于焊接过程具有几方面的优势：首先方波可以实现电流过零期间极性的快速转换，降低了电弧的冷却和重组程度，这对于电弧在相反极性中的重新引燃具有帮助作用，设置与电流过零同步的瞬态高压可以进一步帮助电弧再引燃。其次，方波电源具备调整两个半波间权重的能

力，因此可以对焊接过程提供更进一步的控制，例如，当需要增加电弧清理作用时，可以增加正半波（电极）的相对作用时间，而当需要增加被焊材料的熔化时，可以增加负半波的相对作用时间。这种效果也演示于图6.4中。除了上面描述的优点，这种电源还可以在提供主电路电压稳定的同时，附加远程低压控制。

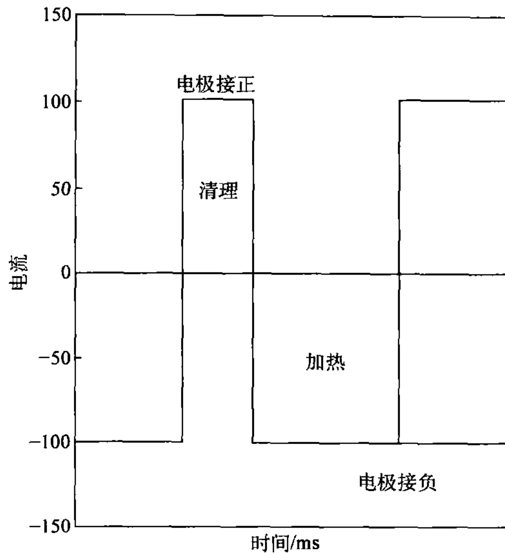


图6.4　交流方波操作对钨极惰性气体保护焊的作用

高频脉冲技术的更进一步的发展是使用高频晶体管开关转换电路，当直接施加到传统直流电源或逆变直流电源的输出端，就能够获得交流方波输出。据报导[34]，这类装置能够在100μs内转换输出端的极性，在焊接铝合金时，当设置其钨极作为阴极的周期为20ms，作为阳极的周期为4ms（也即脉冲频率为41.66Hz）条件下，可以提供有效的阴极清理作用。

6.3.4 冷丝和热丝钨极气体保护焊

钨极气体保护焊的一个有用的特征是可以通过独立添加冷丝来控制焊接熔池的温度和尺寸，这一般在手工电弧焊过程中用于控制焊缝形状和熔深，特别是在全位置焊接时。在手工电弧焊接时也可以实现机械化添丝，可以通过独立的手持送丝机构或安装于焊枪上的送丝系统实现。然而，虽然机械化添丝可以增加焊接过程的操作效率，但这些仅适用于简单的焊缝几何形状并且接头几何相干性良好。

在自动化的钨极气体保护焊中，通常以某一设定的常速添加焊丝，焊工也无法对这一过程进行控制。有报导[92]介绍过一款自动化送丝设备，Dabber TIG·™

（Dabber TIG 是 Hobart 公司的商品名）能够如人工送丝一样实现摆动送丝，送丝频率可以设定为 2 ~ 10Hz 间，这样能够实现可控的低热输入熔滴过渡。这一技术特别适用于切割工具精整边缘的焊接以及燃气轮机叶片等部件的焊接。

6.3.5 热丝钨极气体保护焊

一般地钨极气体保护焊被认为是一种“低生产率高质量”的焊接方法，因为其允许使用的焊接速度较低，并且在冷丝添加时熔敷效率也很低。然而，研究表明[93,94]，通过使用“热丝”作为填充材料，钨极气体保护焊的熔敷速率可以得到大幅度提高，甚至可以与熔化极气体保护焊相当。

热丝钨极气体保护焊过程如图 6.5 所示，其最基本的特征是连续进给被加热的焊丝，焊丝是通过导电嘴尖端和熔池间的直流或交流电流以电阻热的形式加热的。与冷丝添加不同，热丝钨极气体保护焊中焊丝一般添加到熔池后部，虽然在全位置焊时也曾经有过报导将焊丝从熔池前方添加。热丝钨极气体保护焊所需要的设备包括：高精度的焊接电源（如电子控制的稳定的主电路电压），高质量的送丝系统以及有效的气体保护装置。使用交流电源加热焊丝能够减少可能的磁场扰动对电弧的影响。热丝在不同条件下所能达到的熔敷速率示于图 6.6 中。

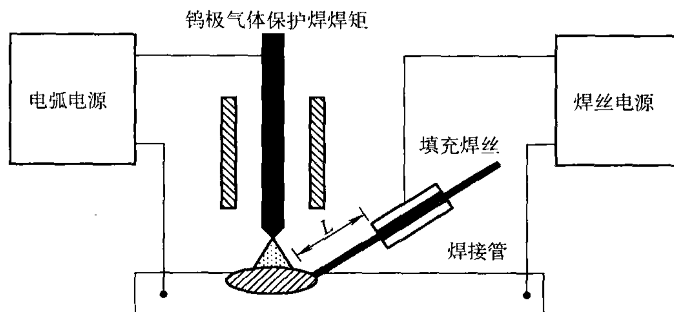


图 6.5 热丝钨极气体保护焊

一种基于逆变电源技术的热丝钨极气体保护焊新系统已经开发出来，并在发电行业中得到评估。这套系统包含以直流逆变技术为基础的钨极气体保护焊接电源作为主电路系统；一组额外的电源电路及其控制系统用于对焊丝进行加热，这组电源及控制系统以逆变器的高频交流输出作为输入，这样的系统设计成本较低，节约能源同时结构紧凑[95]。该系统虽然比常规钨极气体保护焊设备更复杂，但研究结果表明，其熔敷速率可以达到 10 ~ 14kg/h，而且接头完整性良好。热丝钨极气体保护焊已经在石油工业中用于焊接输油管线中 30mm 厚的管壁。在这一应用中，采用了四部焊枪围绕管道同时旋转，完成焊接。

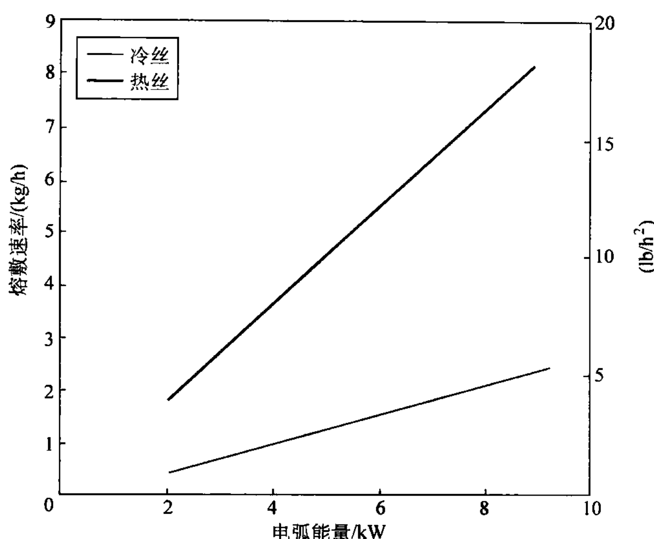


图6.6 热丝和冷丝钨极气体保护焊熔敷速率的对比

6.3.6 双气体钨极气体保护焊

在常规焊接条件下，在钨极气体保护焊的过程中会发生电弧向中心部位压缩的现象，这是由于洛伦茨力的压缩作用导致的，而洛伦茨力是电弧中的电流及其产生的磁场交互作用的结果。洛伦茨力与电流的平方成正比，因此当电弧电流小于20A时，洛伦茨力的拘束作用非常小，但当电流超过100A时，其作用则非常显著。外加轴向磁场，或通过对电弧外围施加强制气体冷却，导致热拘束对电弧产生拘束作用，降低电弧外围的温度，减少了电流可通过的区域，限制了带电体（电离介质）的数量，从而提高了电弧内部区域的温度和能量密度。

这种效应被应用于双气体保护钨极气体保护焊中[96]，如图6.7所示。一个环绕着电极的圆柱状喷嘴引导着较低温度的保护气体沿电弧外围流过，这一气体对电极和紧邻电弧的区域提供保护，同时也引起热拘束作用并增加电弧的挺度，此外还有一组同轴气体对熔池及其附近区域提供保护。用于内部和外部的保护气体可以具有不同的组分，例如在焊接低碳钢时，可以使用氩气+5%的氢气作为内部保护气体（提供更强的电弧拘束作用和挺度，详见第4章），而外部保护气体使用纯氩气或氩气+20%的二氧化碳。双气体保护系统已经用于不锈钢、碳钢以及非铁材料包括铝等的焊接。小电流时（20~50A），这种焊接方法改善了电弧挺度，并且所需要的平均电流较常规钨极气体保护焊低30%~40%。对于厚度不超过3mm的铝合金和厚度不超过4mm的钢，可以直接准备“I”形坡口进

行焊接，而且相对于传统钨极气体保护焊，焊接速度提高20%也是可能的。如果焊接电流达到335A或以上，对于4～6mm厚的板，小孔型焊接也是可能实现的。

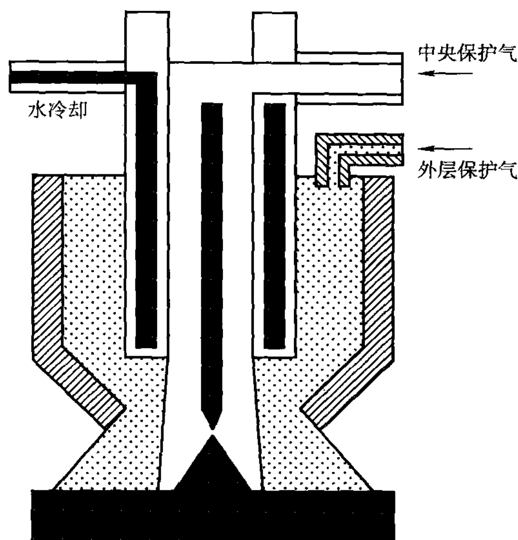


图6.7 双保护钨极惰性气体保护焊

通过水冷铜喷嘴对钨极气体保护焊的电弧施加物理拘束，如图6.8所示。对于预定的电流将产生更高的电流密度和电弧中心温度。当采用这种技术时，相对

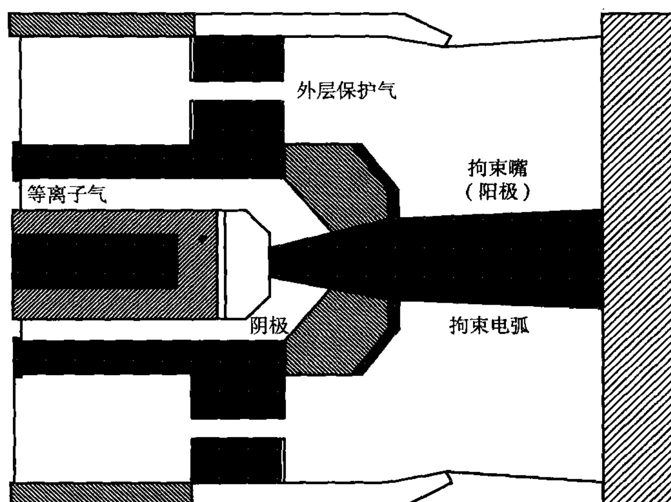


图6.8 等离子弧焊炬中电弧的约束

应的焊接方法通常被称为等离子弧焊接[97]。（也可参考第11章）

6.3.7　等离子弧焊接

在等离子弧焊接过程中，电弧一端形成于非熔化电极的端部，另一端形成于被焊工件或拘束喷嘴。同样的，可以选择不同的气体分别作为保护气体和等离子弧形成气体，当然，通常选用氩气作为中心部位的等离子弧形成气体，而选择氩气或氩气/氢气混合气体（条件允许时）作为外层保护介质。

等离子弧焊接有两种可能的操作模式：转移弧模式和非转移弧模式。

1. 转移弧模式

在转移弧模式下，电弧维持于电极和工件之间，如图6.9所示。电极通常作为阴极而工件一般接电源正极。在这种模式下，可以实现很高的能量密度，并且所产生的能量可以高效地传递到工件上。

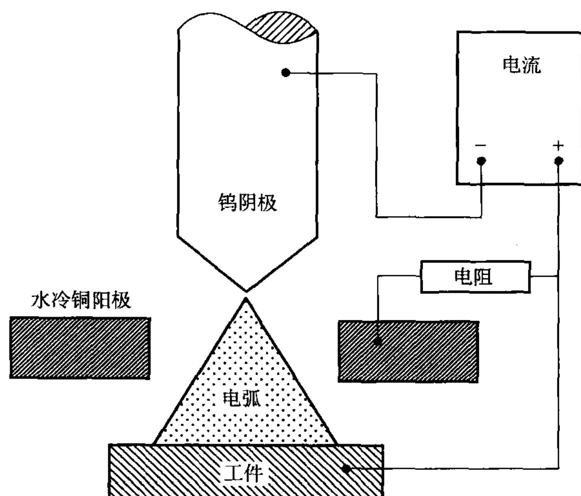


图6.9　转移弧模式

2. 非转移弧模式

在非转移弧工作模式下，电源施加在电极和拘束孔上，电极通常接电源负极性端，相应地拘束孔作为阳极。这种模式下的焊接过程如图6.10所示。在这种模式下，传递到工件上的能量几乎没有，非转移弧主要起到先导作用，先导电弧可以使主转移弧非常快速地建立起来。先导电弧可以通过高频交流引弧或焊枪内简单的接触引弧装置建立起来，当先导电弧建立起来后，主电弧（或转移弧）可以在任意时刻通过在电源与工件间建立完整的回路形成，如图6.10中所示。

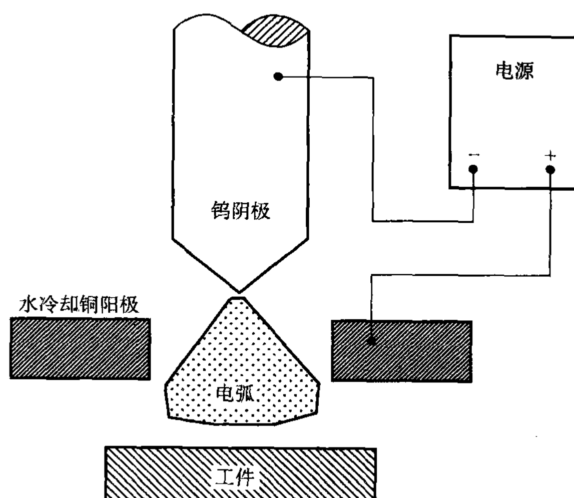


图 6.10 非转移弧模式

3. 设备要求

等离子弧焊接所需要的最基本设备仅比常规钨极气体保护焊或双气体钨极保护焊略微复杂，由焊接电源、控制单元以及等离子焊枪组成。

通常用于等离子弧焊接的都是直流电源（虽然通过合适的设备以使用交流电源焊接铝合金也是可能的，而且上文中提到的可变极性或交流方波系统已经开发出来用于等离子弧焊接的电源）。与钨极气体保护焊相同，具有恒流型伏-安特性曲线的电源系统也适合于作为等离子弧焊接的主电弧电源。

控制系统通常包括非转移型先导电弧供给单元、保护气控制和引弧单元。控制系统可以采用外加式方法或直接集成的方法应用于主电源系统中。

焊枪结构如图 6.11 所示，比钨极气体保护焊焊枪略复杂一些，其中必须包含一系列配件并进行预先设计，以冷却可更换的铜制拘束喷嘴，提供等离子气体和独立的保护气体。非熔化电极通常为钍钨极。和钨极气体保护焊一样，等离子弧焊可以在没有填充金属的情况下完成焊接，但当需要填充金属时，等离子弧焊的焊丝通常也是在熔池前方添加的。

4. 等离子弧焊接的操作模式

等离子弧焊接时通常采用直流反接方式（电极接负极）。当然，如同钨极气体保护焊一样，在焊铝及铝合金时，也可以采用交流或直流正接。在这种情况下，通常需要特殊设计的焊枪，并使用大尺寸的电极。等离子弧焊接可以如钨极气体保护焊一样采用潜弧焊方式，差别仅在于使用了拘束电弧作为热源；另外，等离子弧焊还可以采用小孔型焊接模式，这样能够充分利用等离子弧高能量密度

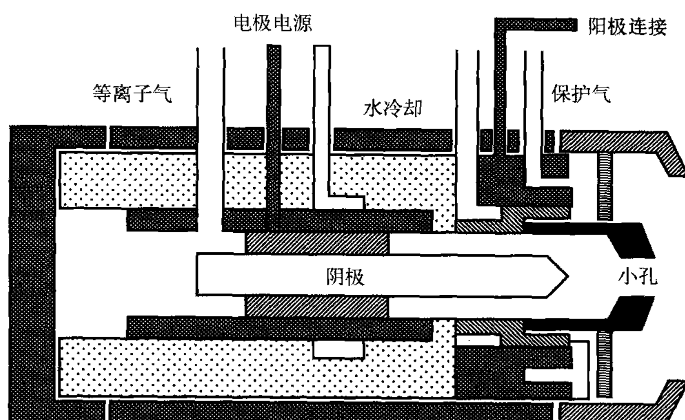


图 6.11 等离子弧焊焊炬

和较大的电弧挺度的优点。详细的介绍请参阅第 8 章。

5. 等离子弧焊的特征及其应用

等离子弧焊的特征及其应用随着采用电流范围的不同而变化，例如：小电流：0.1～15A；中等电流：15～200A；大电流：大于200A。

1）小电流或微束等离子弧焊接：小电流等离子弧焊，相比于钨极气体保护焊的最主要优点是：即使当电流在 1～2A 时，也具有优越的电弧稳定性，而这种情况下钨极气体保护焊的电弧已经难于正常工作。较小的电弧根部作用区域和更强的指向性也是等离子弧焊接的优点。在小电流条件下，先导电弧可以确保主电弧可靠地引燃，同时还具有在焊前预处理接头的作用。微束等离子弧的这些特征使其适于焊接非常薄的材料，包括电子部件及产品的封装、小孔径过滤部件[98]或燃气轮机叶片的修复等。

2）中等电流等离子弧焊接：电流范围在 15A～200A 以内时，该方法与钨极气体保护焊相似，但在相同电流条件下，可以获得更高的速度或更高的熔化效率。此外，等离子弧焊接对于很多参量变化具有更大的裕度；钨极处于被保护状态避免了与工件的偶然接触引起的电极污染，因此等离子弧焊也被用于焊接硅钢片变压器的叠片结构，而钨极气体保护焊在这类焊接中出现钨极污染问题。

3）大电流等离子弧焊接：在大电流条件下，可以采用小孔模式的等离子弧焊接模式。这使得板材厚度小于 9mm 的“I”型坡口单面焊透成为可能。在这种模式下，精确的焊枪控制和稳定的焊接速度非常重要，否则易发生咬边现象。小孔模式等离子弧焊接的典型应用在于高速焊接板带或管的长直焊缝。该方法也被用于厚壁管材的打底焊。

6.3.8 多阴极钨极气体保护焊

钨极气体保护焊中限制其最大焊接速度的最主要因素之一是咬边现象的发生[99]（见下文6.4节），并且，虽然双面保护和等离子技术增加了电弧潜在的热效率，它们同时还具有增加出现咬边现象的倾向，这又反过来限制了它们在高速焊接中的应用。这一问题也许可以通过将更多焊接电弧串列（图6.12）形成加长的热源来得到解决，这一技术被称为多阴极钨极气体保护焊，其最初开发于1970年代[100]。多阴极钨极气体保护焊时所能够获得的速度虽然取决于阴极的数量和相互间的距离，但如图6.13所示，多阴极条件下的焊接速度明显高于传统的钨极气体保护焊。这一方法主要用于管材制造企业高速焊接长直焊缝的特殊需求。为避免电弧在交互作用的局部磁场中可能发生的磁偏吹现象（图6.12），多阴极钨极气体保护焊通常采用高频脉冲、双面保护以及磁场稳弧等技术。

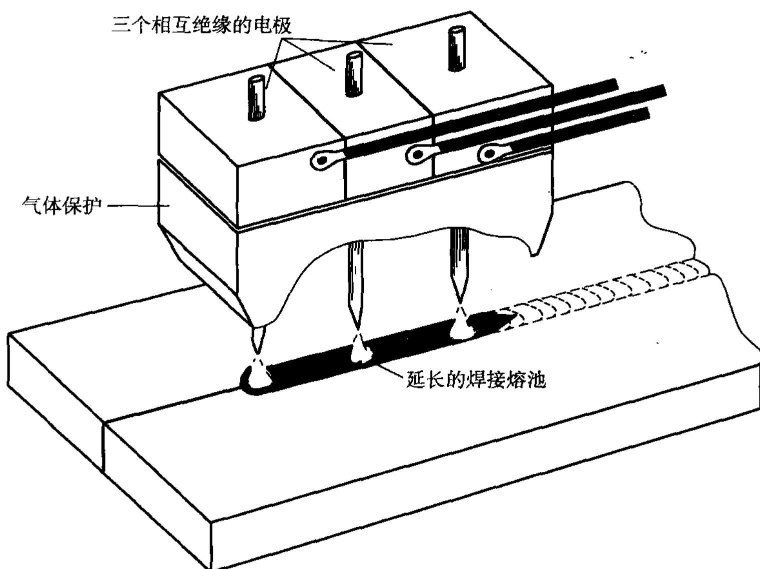


图6.12 多阴极钨极惰性气体保护焊

6.3.9 活性焊剂钨极惰性气体保护焊

乌克兰的巴顿焊接研究所开发了一种新技术，通过在被焊工件表面涂敷一层焊膏扩展了钨极气体保护焊的参数范围。这些焊膏在焊接前刷在接头表面或直接喷在接头表面。这些焊膏明显地改变了焊缝形貌：增加了深宽比，消除了偶发因素导致的问题。当采用这些活性焊剂或焊膏时，所对应的焊接方法被称为A-TIG

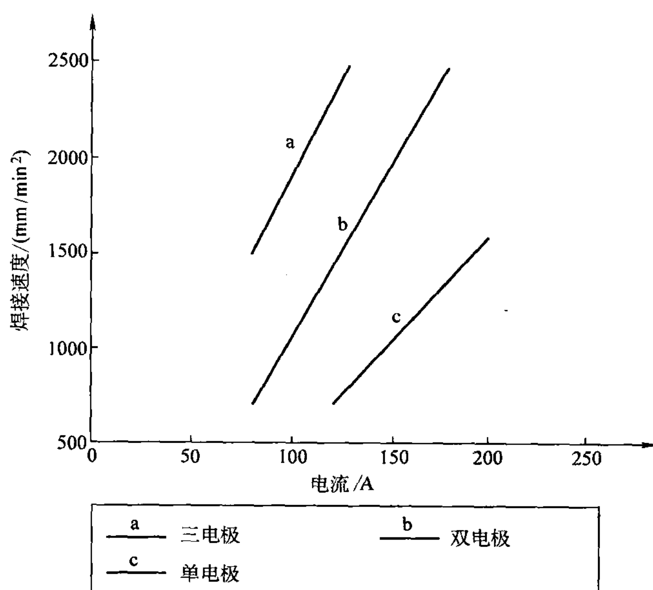


图6.13 使用多电极提高对接熔透焊的焊接速度
(所用材料：1.2mm 厚304 不锈钢)

或 PA-TIG（巴顿 A-TIG）[101]。焊剂组分随被焊材料及其应用的不同而变化，有些条件下采用无氧盐（卤化物），而另一些条件下简单采用氧化物如二氧化钛、二氧化硅等都是有效的。活性焊剂条件下焊接过程得以改善的详尽机理仍未得到完全的理解，但有人提出表面活性的盐可能会影响到熔融金属的表面张力或者向电弧中释放离子促进了电弧收缩。

6.3.10 潜弧钨极气体保护焊

潜弧钨极气体保护焊最早开发于美国，但在乌克兰和澳大利亚得到了进一步的发展。电弧引燃于被焊试板的表面，然后利用等离子弧力压低熔池同时电极位置下降，直到电弧尖端的位置低于工件上表面，电弧作用于熔池压低后所形成的空腔内，如图6.14所示。

这种操作模式提高了电弧热效率，并允许采用更高的焊接速度，其通常应用于大电流焊接的自动化焊接系统中。

6.3.11 大电流钨极气体保护焊

钨极气体保护焊时，电流进一步增加就会产生足够大的电弧压力形成小孔。相应地，容量达到1000A的焊枪已经开发出来。在大电流模式下，钨极气体保

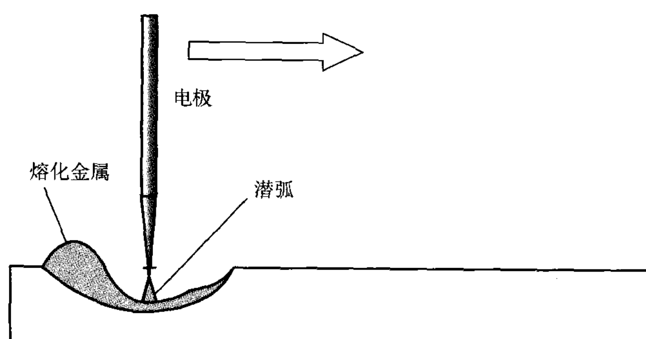


图 6.14 钨极惰性气体保护焊焊接速度与电流关系

护焊可以提供高焊速，能够替代等离子弧焊接。

6.4 钨极气体保护焊的控制及相应方法

钨极气体保护焊及其衍生方法有能力生产很高质量的焊缝，但从一致性和稳定性的角度考虑，必须确定焊接参数对焊缝形状及质量的影响并对其进行控制。

6.4.1 传统钨极气体保护焊

传统直流钨极气体保护焊中的主要控制参数见表 6.2。

表 6.2 传统直流钨极惰性气体保护焊中的主要控制参数

主 要 参 数	次 要 参 数
电流	弧长
焊丝速度	极性
	保护气体
	电极倾角
	填充材料

1. 电流和焊接速度

平均电流通常决定了电弧的加热效果、电弧压力和挺度。在次要影响参数固定的条件下，熔深和其他熔化特性是由平均电流和焊接速度共同决定的。然而，电流增大到一定程度就会出现不可接受的焊缝形貌，这限制了最大焊接速度、熔深及熔化区域。大电流时产生的电弧力改变了熔池的形状，当焊接速度较高时，形状改变的熔池金属没有足够的时间在凝固前回流到接头中去，结果导致焊缝不连续、咬边或不规则的焊瘤等缺陷。Savage 等[102]研究了这些缺陷的产生临界条件，确定了一系列不同的电流、焊接速度组合作为临界工艺条件，列于图 6.15 中。通过控制次要影响参数或采用多阴极技术可以在一定程度上减弱相应的限制条件的影响。

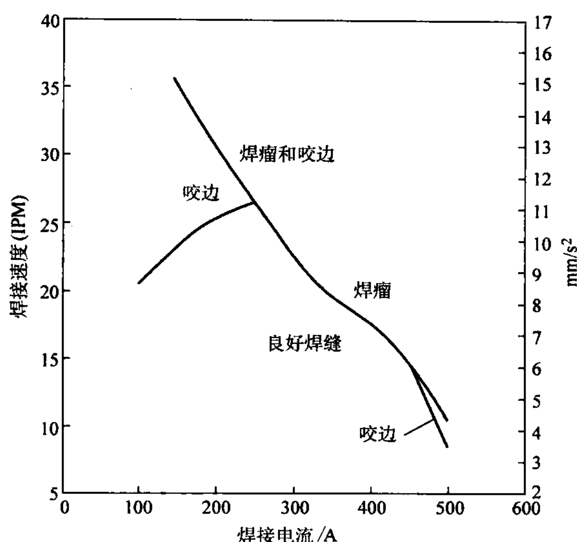


图6.15　电极尖角对电弧电压的影响[56]

2. 弧长

钨极气体保护焊中的弧长通常被认为等于电极端部到试件间的距离。增加弧长的效果是降低了电弧的热效率及相应的材料熔化，同时降低了熔深。效率的降低是由于电弧弧柱部分向外辐射热量的增加引起的。即使弧长增加使得电弧电压增加，由此总的功率也增加，但这种效率的降低仍然存在。对于传统钨极气体保护焊，为获得具有较高一致性的焊接效果，将电极与工件间的距离维持稳定是非常重要的。电弧电压可以反应弧长信息。

3. 极性

在钨极气体保护焊中，热量在阴极和阳极的分布为：大约60%～70%的热量被阳极吸收，而仅有约30%～40%的热量被阴极吸收[103]。大部分应用使用直流反接方式（电极接阴极），因为这样可以提供最佳的加热特性和最小的电极/焊枪产热。对于铝及铝合金，直流正接具有很重要的优点：可以对试板表面提供阴极清理作用。但为了优化工艺过程的效率，对这些材料通常采用交流焊接，这样在直流反接的半波内，可以对被焊板材提供高效率的加热，在直流正接的半波内，可以对被焊板材提供阴极清理作用。

4. 保护气体

正如在第5章中已经讨论过的，保护气体对电弧热特性及焊接熔化行为具有显著的影响，这些作用可以拓宽焊接过程的操作参数范围。例如，在400A焊接电流条件下，采用氩气保护时出现焊瘤前的最大焊接速度为7.6mm/s，而采用氦

气保护后最大焊接速度可以达到22.3mm/s。

5. 电极倾角

钨电极与地面间的夹角对电弧压力有显著的影响[56]，如图6.16所示，小的夹角增加电弧压力和电压，而大的夹角减小电弧压力。因此大电流时为避免咬边或焊瘤等缺陷，通常建议使用大的电极倾角。电流非常小时电极倾角还影响熔缝几何形状，其效果与相对板厚（相对板厚是指板的厚度与可达到的熔深间的相对关系，这时“厚”板意味着熔深小于板厚的30%，“中厚”板的熔深约为板厚的30%～70%间，而“薄”板代表熔深为板厚的70%～100%）有关。相应规律总结于表6.3中。对于“薄”板上的大深宽比焊缝，需要采用小的倾角，而对于“厚”板上的大深宽比焊缝或小熔深焊缝时，需要采用大的倾角。当然，这些效果还与材料组分、保护气体及接头几何形状等因素有关。最后，很明确地，电极角度的变化虽然对熔深特性有显著的影响，但最终的焊缝形貌还将取决于材料及前面讨论过的气体的焊接参数。

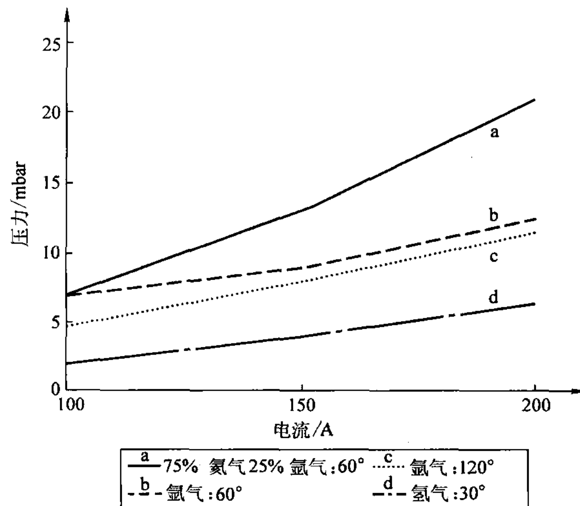


图6.16 钨电极倾角对电弧压力的影响

表6.3 熔深形貌与电极倾角间的关系

电极倾角（°）	与相对板厚有关的焊缝形貌（深宽比）		
	薄板	中厚板	厚板
30	高	低	低
120	低	高	高

6. 焊丝添加

冷焊丝的添加将冷却焊接熔池并减少用于被焊试件熔化的热量。然而，在某

些条件下，很少量的能够改变熔池表面张力的元素可以通过焊丝添加到熔池中并提高熔化特性，后文将讨论这一问题。

7. 钨极气体保护焊中的偶然性变量

虽然当上文中列出的各种因素都得到考虑时，钨极气体保护焊的过程简单易懂，但该方法也体现出焊接性的差异，特别是小电流条件下焊接不锈钢时。这种现象被称为“cast-to-cast”变量（由于没有特别准确的中文直译，译稿中取意译为偶然性变量，因其经常发生于具有相同名义成分但不同批次的材料焊接过程中）。这一问题获得了相当高的重视，目前被认为与材料中杂质元素的含量有关。对于不锈钢而言，硫、钙、氧的含量变化已经被确认具有重要的影响。例如，图6.17中两块低碳不锈钢（304L）采用相同的参数焊接，分析母材发现其唯一的差别在于硫的含量，图a为小深宽比的焊缝，其中硫的含量为0.004%，而图b为大深宽比的焊缝，其硫的含量为0.007%。

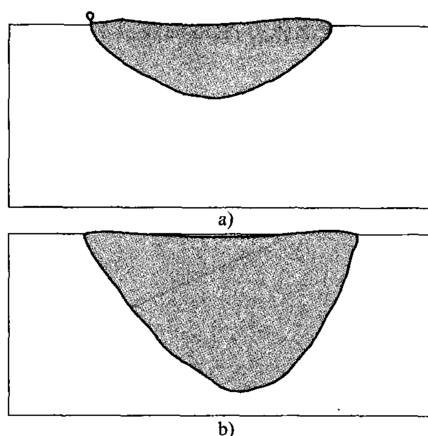


图6.17 从两个3mm厚的304L不锈钢钢管钨极气体保护点焊接头上取的焊缝轮廓（焊缝在同样条件下完成）
a）小深宽比 b）大深宽比

如硫这类元素如此小的含量波动所造成的影响可以解释为它们对液态熔池表面张力随温度的梯度的影响以及由此引起的熔池内部金属流动的不同。众所周知，熔化的铁的表面张力梯度会由于微量元素的存在而改变，如图6.18所示[104a+b]。如果表面张力-温度曲线的斜率是负值（低温时表面张力高），就会在熔池表面发生表面张力驱动的液态金属流动，流动的方向从熔池中心的高温区指向外侧低温区，如图6.19a所示；如果表面张力梯度曲线的斜率为正，液态金属将从熔池的外围向中心流动，而中心区的高温金属将向下流动，促进了中心熔化区域的增加，如图6.19b所示。这一作用就是人们熟知的‘马瑞格尼流动’[105]，而其机理也解释了很多材料对其中微量元素含量波动的敏感性以及相应的焊缝几何形状。

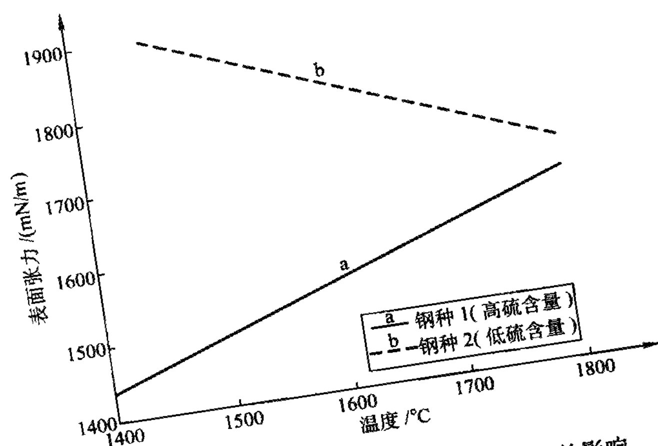
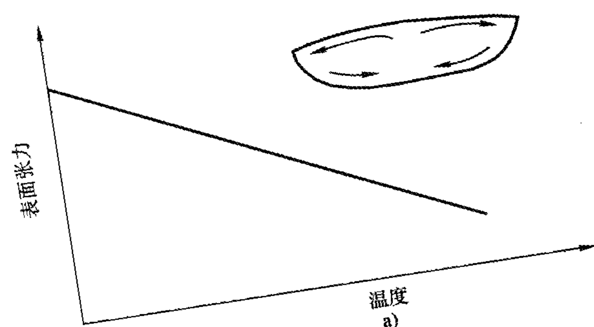


图 6.18　铁的表面张力-温度曲线及示踪元素的影响



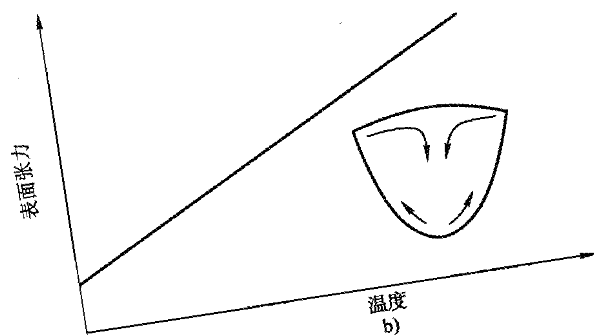


图 6.19　表面张力梯度对焊接熔池流动的影响

焊缝熔深还受到其他因素的影响：电磁力（也称洛伦兹力）、液体浮力（液态熔池中由于温度梯度而产生的密度差别会导致液体流动）、空气动力（由于喷嘴产生的等离子体流过熔池表面而产生）等都被认为会对熔深产生影响。当电流较大时，能量传递和熔池内液体流动似乎更主要地由电弧等离子体及其对熔池的压力决定。

偶然性变量的影响可以通过使用较大电流的脉冲焊接来降低，也可以通过选择保护气体（例如氩气/5%的氢气用于奥氏体不锈钢）或添加适当的含有正表面张力-温度梯度系数的元素（对于奥氏体不锈钢而言为硫元素）的焊丝降低偶然性变量的影响。还有报导指出偶然性变量的影响也可以通过在工件上涂一层表面活性焊膏来解决，正如前文中描述过的活性钨极气体保护焊一样。然而为控制这一问题，有必要确定可能存在问题的材料，这可以用几种办法实现，包括：化学成分分析；直接的焊接性实验或间接的焊接性实验。

化学分析可能是确定潜在问题的可行的手段，但可能代价较高，而且从所需分析的表面活性元素含量之低和成分分析与熔深形状结果吻合存在不确定性的角度看，该方法并不可靠。

直接的焊接性实验需要采用焊接规范所需要的焊接接头形式，切割横断面后测量接头断面的面积。这一方法一度非常普遍，但花费时间很长，而且需要专业分析能力。

文献［106～108］阐述了一系列间接的焊接性实验，并发现，在规定的条件下，通过测量焊接熔深达到预先设定的值的方法可以评价材料偶然性因素的影响。此外，还可以通过焊接过程中对熔池采用录像技术、弧光监测、电弧电压信号监测等方法评价材料的特性。

6.4.2 脉冲钨极惰性气体保护焊的控制

通过控制上文中描述的传统钨极气体保护焊中的参数及脉冲参数即可控制脉冲钨极惰性气体保护焊这一过程，脉冲参数的影响已经在上文中描述。

6.4.3 等离子弧焊的控制

等离子弧焊的控制比钨极惰性气体保护焊略微复杂一些，主要的控制参数与钨极惰性气体保护焊相同，但等离子弧气流速度、等离子弧喷嘴的直径和几何形状也都对焊接操作具有显著的影响。小的等离子弧喷嘴会产生更大的电弧力；而大的喷嘴会导致挺度较低的电弧，更接近于钨极惰性气体保护焊电弧。如果等离子气流速太慢，焊接电流过大或喷嘴冷却不足，电弧可能会直接产生在电极与喷嘴的间隙内，这一“双弧”现象将严重损坏喷嘴。

如同钨极气体保护焊一样，更大的电流允许使用更大的焊接速度，但随着电

流的增加，电弧力增加得更显著，这可能会导致咬边缺陷。如果等离子气流量和电流都增大，就可能出现如第8章中介绍的小孔型模式。

控制钨极气体保护焊和等离子弧焊的主要控制因素见表6.4。

表6.4 钨极气体保护焊和等离子弧焊的主要控制参数

钨极惰性气体保护焊的控制参数	电流，脉冲参数，电流升/降时间，电极极性，焊接速度，电极形状，保护气体种类，保护喷嘴尺寸，保护气流稳定性（减压阀），保护气流量，电极干伸长
等离子弧焊的附加控制参数	电极收缩量，导嘴几何形状，喷嘴直径，等离子气种类，等离子气流量，先导电弧电流

6.5 本章小结

对操作过程的一些简单的更改，如采用脉冲模式、多阴极、添加热丝、使用不同的保护气体、涂敷表面活性剂、使用复杂的电源系统、使用双气体保护及等离子弧焊接系统等，使钨极气体保护焊的功能得到了扩展。这些技术的应用可以提供更好的接头质量和更高的生产率。焊接过程中各参数对接头质量的影响得到了更深入的分析和认识，这促进了更多先进技术在该方法自动化焊接过程中的应用，其中一些已获得的进展将在第11章中继续深入讨论。

第 7 章　熔化极气体保护焊

7.1　引言

由于熔化极气体保护焊具有更高的利用率和熔敷率，因此比钨极惰性气体保护焊和手工电弧焊具有更大的生产率提高潜力。尽管充分挖掘这种焊接方法经济效益的需求，明显导致了世界范围内更大规模利用熔化极气体保护焊的趋势，但过去的应用情况证明这种方法很难获得可靠的焊接质量。因此如何提高控制水平、获得稳定质量成为开发的主要推动力。

为了讨论这方面所取得的进展，有必要重新考虑焊接过程的基本特点，特别是熔化极气体保护焊的熔滴过渡和传统熔化极气体保护焊的控制。

7.2　熔化极气体保护焊中的熔滴过渡

材料从熔化的电极尖端过渡到熔池中的方式对熔化极气体保护焊的整体性能具有重要影响：它影响到焊接过程的稳定性、飞溅的产生、焊缝质量和全位置焊接的能力。研究者采用高速摄影、频闪摄影和视频技术对熔滴过渡形式进行了现象学研究[109]，对各种自然的过渡类型进行了分类。图 7.1 所示是一个简化的基本分类方法。

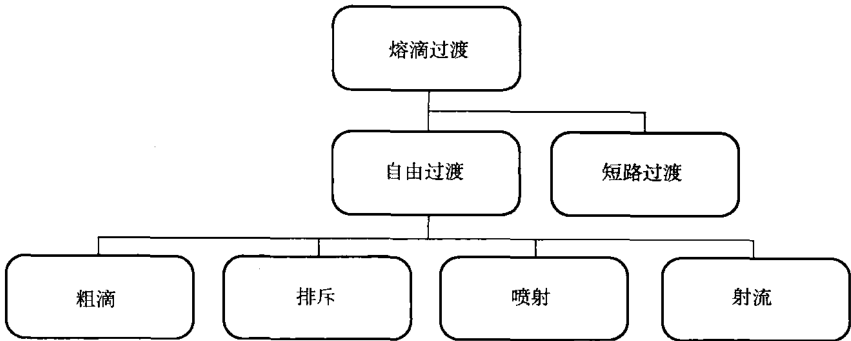


图 7.1　熔化极气体保护焊熔滴过渡的分类

在自由过渡中，电弧在电极和工件之间燃烧，熔化金属以熔滴形式穿过电弧

空间进行过渡。熔滴尺寸和过渡频率可能变化很大，因此有必要将自由过渡再分为几个小类以反映这些变化。一般的自由过渡形式为：粗滴过渡（滴落和排斥）和喷射过渡（射滴、射流）。

7.2.1 粗滴滴落过渡

粗滴滴落过渡的特点是熔滴大、过渡速率低（图7.2）。一般在电流较低、电弧电压相当高时出现这种过渡形式。当然这也取决于焊丝直径、成分及保护气体。例如，当采用1.6mm铝焊丝、氩气保护、电流为100A时，可以观察到熔滴过渡频率低于1Hz。在钢的CO_2气体保护焊中，当电流在200A以上时，焊丝直径处于一定范围内都会出现粗滴过渡。

熔滴的形态及对其形成过程的观察都表明，过渡机制由重力控制；即，由质量引起的重力是熔滴脱离的作用力，而表面张力起到阻止熔滴分离的作用，当熔滴尺寸增大到向下分离作用力克服表面张力时，熔滴脱离焊丝。尽管也存在电磁力，但在低电流条件下电磁力不足以对熔滴脱离产生影响。

虽然平均电流值较低，但对于实心熔化极气体保护焊，由于重力的支配作用，这种过渡形式具有十分有限的空间位置能力。

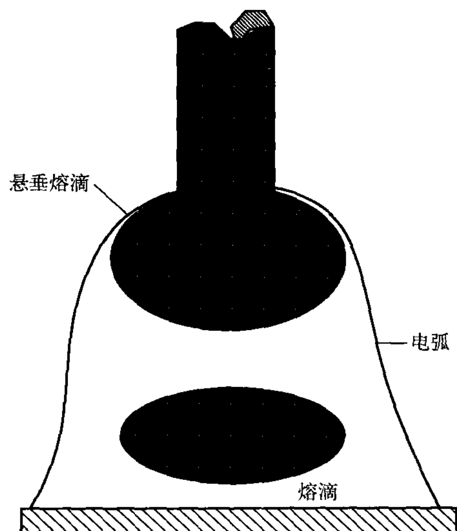


图7.2 粗滴过渡

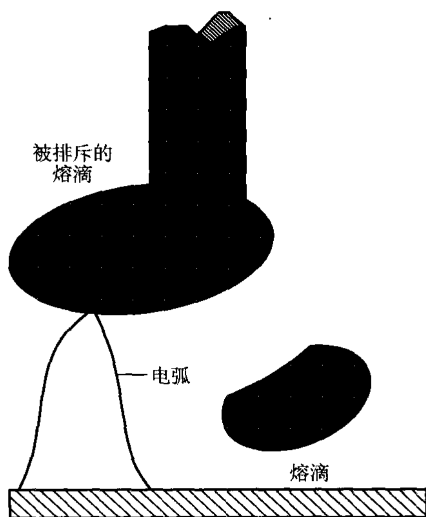


图7.3 排斥过渡

7.2.2 粗滴排斥过渡

在某些情况下，在电极端部形成的熔滴可能会偏斜到一侧，甚至被电弧排斥。这种情况一般是在实心焊丝反极性条件下出现，如图7.3所示。起支配作用

的力是重力，而排斥作用是由电磁感应形成的等离子力或蒸气喷射引起的反作用力作用在熔滴底部弧根处，对熔滴有托起作用。一旦熔滴被这样托起后，不对称磁场就会形成，在各种力作用下（如下所述），熔滴可能旋转或被排斥。由于稳定性差、飞溅大，所以通常不希望获得这种过渡形式。

7.2.3　射滴过渡

随电流的增大，熔滴尺寸通常会减小，过渡频率增加。此外，还可以发现熔滴沿轴向方向喷射穿过电弧。在某些情况下（如碳钢在富氩混合气体中或铝在氩气中），随电流增大，在粗滴过渡和射滴过渡之间存在一个明显的转变[110]（图7.4）。发生过渡形式转变的临界电流是一个重要的特性参数，称为喷射临界电流。其值取决于焊丝尺寸、成分及保护气的成分。钢的典型值如表7.1所示。在临界电流以下，过渡形式是粗滴过渡或短路过渡；在临界电流以上，过渡形式是小熔滴形成的稳定束流，熔滴直径与焊丝直径相似。因为这种过渡形式只发生在较高电流条件下，热输入量大、熔池尺寸大，这些特点对于高熔敷率平焊具有吸引力，但空间位置能力受到限制。

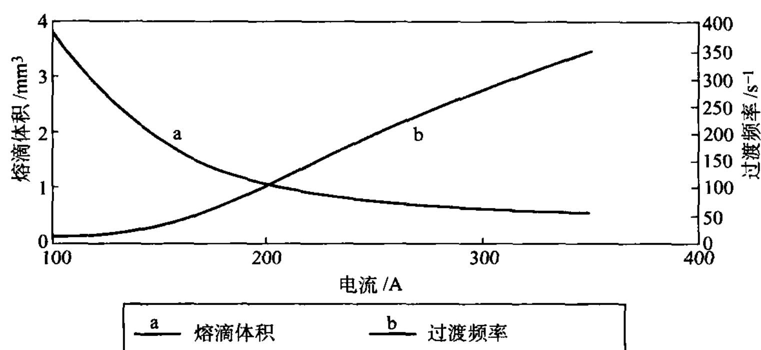


图7.4　氩/2%的氧中 ϕ1.2mm 不锈钢焊丝的过渡特性[110]

表7.1　普通碳钢焊丝的喷射临界电流

焊丝直径/mm	各种保护气体混合物中喷射临界电流/A		
	氩/5%的 CO_2	氩/15%的 CO_2	氩/20%的 CO_2
0.8	140	155	160
1.0	180	200	200
1.2	240	260	275
1.6	280	280	280

7.2.4 射流过渡

随电流继续增大，熔滴尺寸进一步减小，电极尖端逐渐变细，一束很细的熔滴沿轴向被喷射穿过电弧，如图7.5所示。这种过渡形式称为射流过渡，它是由电磁力的显著增大引起的。对于高电阻率、小直径焊丝（如奥氏体不锈钢），电流在300A以上时，这种过渡形式较易出现。大电流时焊接熔池的湍流及气体卷入可能会限制这种过渡形式的形成。

7.2.5 喷滴过渡

向射滴过渡的转变在一个较窄的电流范围内进行，但已经发现[111]一种重要的中间过渡形式会在这个转变范围内出现。这种过渡形式的特点是在焊丝尖端会形成圆锥形颈缩，直径略大于焊丝直径的球形熔滴先是悬挂在焊丝尖端，然后与焊丝脱离（图7.6）。熔滴脱离时效率很高，并且所测得的熔滴速度很高、飞溅损失很低。对于1.2mm碳钢焊丝，采用氩气/5%的二氧化碳保护时，这种过渡形式出现在250～270A之间，熔滴速度可达7m/min，并观察到熔化速度略有增加，喷滴过渡效率高、'干净'，飞溅很低为微粒烟雾级。但是，在正常的稳定直流操作条件下，它要求对焊接参数进行很精密的控制，而这只能通过第3章所述的高质量电子电源来实现。此外，喷滴过渡的工作范围是非常严格的，但是通过后面介绍的脉冲过渡技术，可以使这个范围扩大。

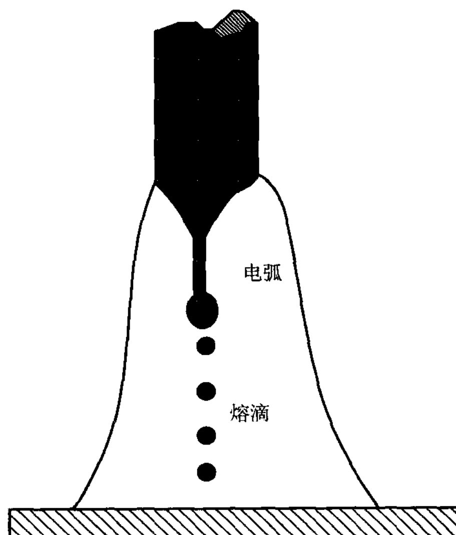


图7.5 射流过渡

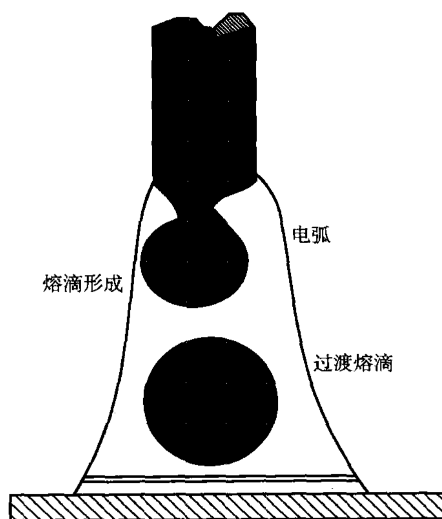


图7.6 喷滴过渡

7.2.6 短路过渡

如果送丝速度超过焊丝的熔化速度，焊丝最终将使电弧短路并伸入熔池中。在自由过渡中偶尔会发生这种现象，被认为是故障状态。但如果参数经过仔细选择，有可能产生频率100Hz以上规则的电弧短路。这种过渡形式称为短路过渡，在图7.7中予以说明。

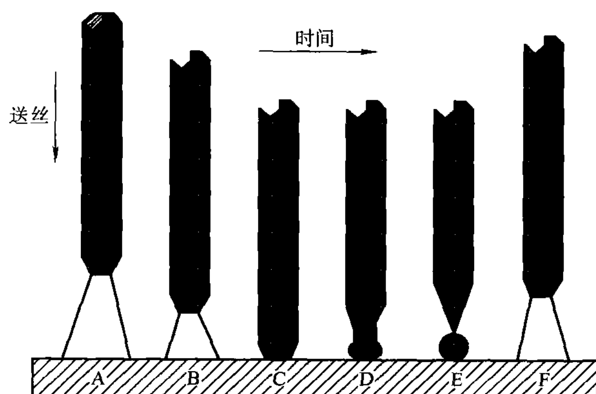


图7.7 短路过渡机制

短路过渡的具体过程如下：焊丝以恒定速度送进，但在燃弧期间焊丝的熔化不足以维持弧长恒定。电弧间隙逐渐闭合，焊丝最终与熔池接触。短路使电源输出电流迅速增大，在焊丝短路部分产生大量电阻热。短路部分断开，一部分被加热的焊丝材料过渡到熔池中，电弧也重新建立起来。如果仔细匹配送丝速度和电源输出，短路过程就会以规则的间隔重复发生。典型的瞬态电压和电流波形如图7.8所示。实际上，为了保持一个规则的高短路频率，电弧必须保持得较短（2~3mm），为了产生短路而在熔池中进行向上运动并不罕见。

短路的断开需要大电流（典型值200~400A），但电弧电流较小，燃弧时间通常比短路时间长，因此，平均电流仍保持在较低水平。如果短路过程中电流过大，短路呈爆破性断开，金属从电弧中被喷出，成为飞溅。在正常焊接过程中，每个短路过程脱离的准确金属量具有不确定性。短路间隔时间、燃弧时间以及熔滴过渡频率是变化的，但短路间隔通常会遵循正态分布，如图7.9所示。该分布的标准差可以作为过程稳定性的衡量指标，最佳条件的燃弧时间具有最低的标准差。低平均电流、低热输入使熔池尺寸小、凝固速度快，这使得短路过渡适合于空间全位置焊接和薄钢板焊接。

短路的随机性特点以及过程不稳定性、飞溅倾向大都是短路过渡潜在的局限性。但这些问题通过保护气体的选择（见第5章）或后面要讨论的电子技术可

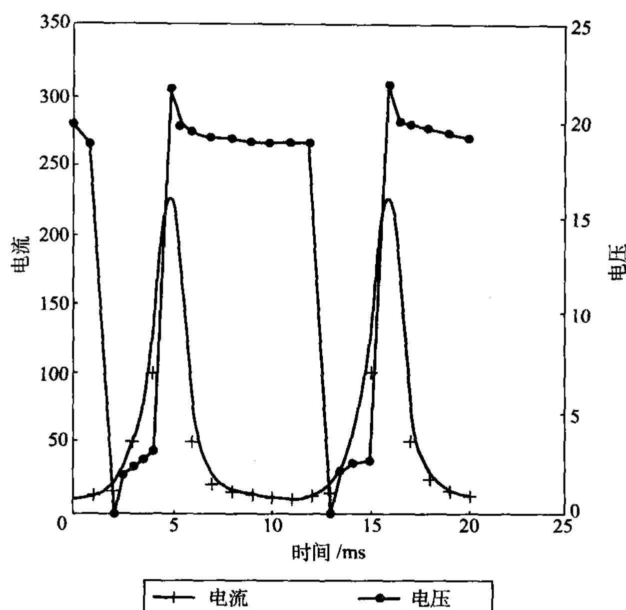


图 7.8 短路过渡的电压和电流波形

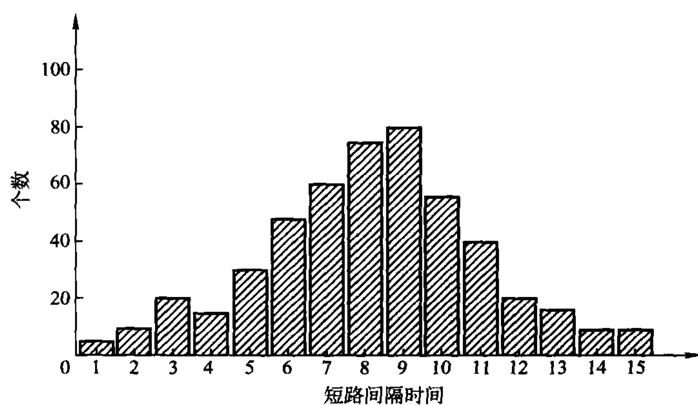


图 7.9 稳定短路过渡短路间隔时间（燃弧时间）柱形图

以实现控制。

7.2.7 其他过渡现象

熔滴过渡通常可归属于以上所述各类型之一，但还有几种正常过渡的变化形式也会出现。

1. 爆炸过渡

已经观察到，在电极尖端悬挂的熔滴可以以爆炸方式喷射出金属。其产生原因被认为是熔滴中的化学反应（气体-金属之间或熔渣-金属之间）。这些爆炸在药芯焊丝电弧焊中有助于过渡，但在熔化极气体保护焊中通常会引起不稳定。

2. 旋转射流过渡

如前所述，在排斥过渡中可能会发生熔滴旋转，但旋转过渡这个词也用于描述在射流过渡中固态焊丝尖端和熔滴之间伸长的金属细丝的旋转，如图7.10所示。在大电流情况下通常不希望出现这种过渡形式，当采用后面要介绍的‘等离子弧-熔化极惰性气体保护焊方法’以及‘T. I. M. E’方法实现表面堆焊时，也采用旋转射流过渡模式。

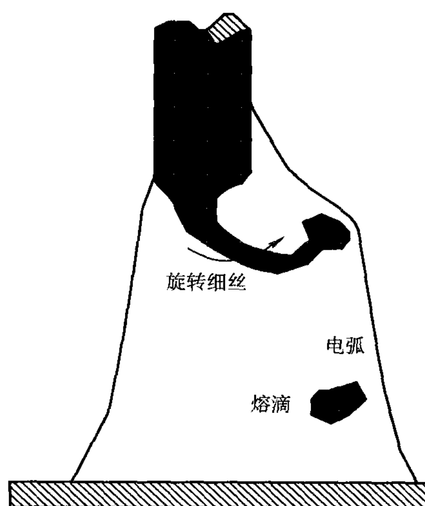


图7.10　旋转射流过渡

7.2.8　药芯焊丝电弧焊和熔渣保护过渡

在药芯焊丝中，由焊剂所形成的熔渣会影响过渡现象。过渡类型取决于所采用的焊剂成分，借助于高速图像转换器摄像机，下面的过渡现象已经得到了确认[112,113]。这些影响通过图7.11予以说明。

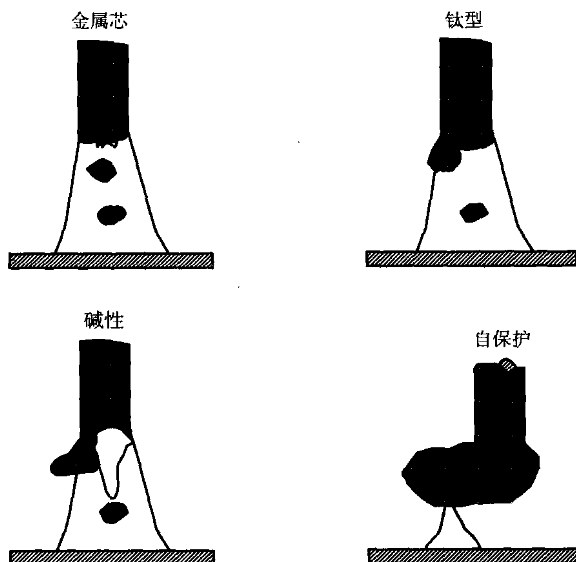


图7.11　药芯焊丝中所观察到的过渡类型

1. 金属芯焊丝

金属芯焊丝中非金属焊剂含量很少，其性能与实心焊丝相近。低电流时可以获得良好的短路过渡特性，大电流时可以获得轴向射滴过渡。此外，在富氩的氩气/二氧化碳混合保护气体中，可以实现稳定的反极性操作。在大电流条件下（例如350A，ϕ1.2mm焊丝，）形成的射流过渡具有熔化速度高、焊缝外形光滑等特点。

2. 二氧化钛药芯焊丝

二氧化钛药芯焊丝一般在喷射方式下使用，呈平稳的非轴向过渡。一部分焊剂熔化后在熔滴表面形成一层熔渣，少量焊剂分解形成保护气体，同时，一部分未熔化焊剂过渡到熔池中熔化形成保护性的熔渣覆层。未熔化焊剂从焊丝尖端的喷射如图7.11所示。

3. 碱性药芯焊丝

碱性药芯配方在低电流条件下形成不规则的短路过渡，在大电流时形成非轴向粗滴过渡。未熔化焊剂形成一个明显的指形，并从焊丝向电弧喷射。气保护碱性药芯焊丝的焊剂配方对熔滴尺寸的影响如图7.12所示。

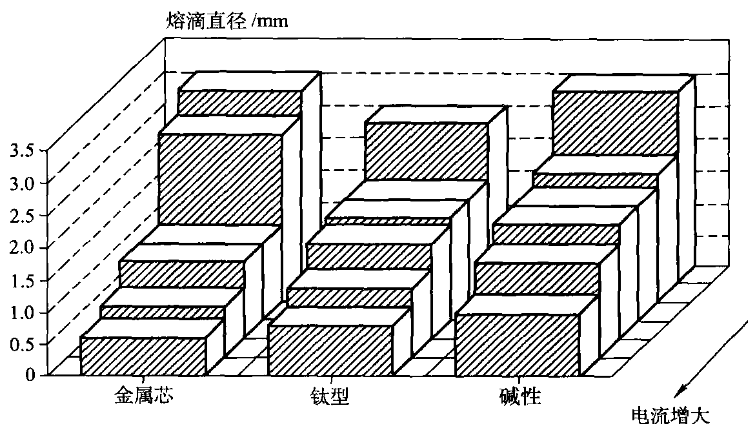


图7.12 使用图像分析得到的熔滴直径范围。注意金属芯焊丝熔滴尺寸的变化、碱性药芯焊丝的大熔滴。

4. 自保护药芯焊丝

这种焊丝一般会产生短路和粗滴排斥过渡，在焊丝尖端可能会形成很大的飘浮的靴形大滴。通过调整焊剂配方可以减小大滴倾向，有证据表明，在熔滴底部会产生二次过渡和爆炸过渡。

7.3 熔滴过渡物理

为了理解和改进过渡特性，有必要更详细地考查熔滴过渡所涉及的机制。前面所述的过渡特性是作用在金属熔滴上各种力平衡的结果。所涉及到的力主要有：重力（F_g）、气动阻力（F_d）、电磁力（F_{em}）、蒸汽喷射力（F_v）、表面张力（F_{st}）。

哪些力起支配作用以及这些力对熔滴过渡的影响取决于具体操作条件（电流、电压、焊丝直径、保护气体等），图7.13给出了自由过渡中熔滴脱离点处力的静平衡的图示，可用式（7.1）描述：

$$F_g + F_d + F_{em} = F_{st} + F_v \tag{7.1}$$

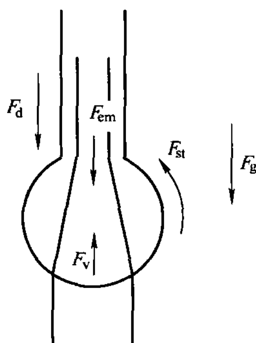


图7.13　作用在熔滴上力的平衡

在短路过渡中，表面张力有助于脱离，除了 F_{em}外，其他力可能都会很小。

后面将会基于普遍接受的经典物理方法对这些力的大小进行说明，但所涉及的很多参数都是时间、温度相关的，因此完整的理论分析要考虑动态特性。

7.3.1 重力

重力由下式给出：

$$F_g = mg \tag{7.2}$$

这里 m 是熔滴质量，g 是重力加速度的垂直分量（即 $9.81\cos\theta \mathrm{ms}^{-1}$，$\theta$ 是电弧轴线和垂直方向的夹角）。在平焊时该力取最大正值（此时 $\cos\theta$ 为 +1），在仰焊时该力取负值（θ 介于90°和180°之间，并且 $\cos\theta$ 为负）。这个力在1.6mm焊丝、氩气保护、小电流（粗滴过渡）条件下的实测结果[114]为：铝是260dyn，铁是600dyn（$1\mathrm{dyn} = 10^{-5}\mathrm{N}$）。

7.3.2 气动阻力

电弧中气体的流动在熔滴上会产生作用力 F_d，可以通过下式计算

$$F_d = 0.5\pi V^2 d r^2 C \tag{7.3}$$

这里 V 是气体速度，d 是气体密度，r 是熔滴半径，C 是阻力系数。当熔滴直径和气体速度较高时，这个力将会最大。气体速度和熔滴直径同时都取最大值是比较少见的；通常小电流时熔滴尺寸大，而在电流较大时气体速度高；因此在大多数情况下阻力都会比较小。

7.3.3 电磁力

当电流流过导体时，会产生磁场和电磁力。电磁力存在于电极尖端、熔化的熔滴和电弧周围，其大小会强烈地受到电流路径和几何形状的影响。力的大小可由下式计算

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi}\ln\left|\frac{r_a^2}{R}\right| \tag{7.4}$$

这里μ是材料的磁导率，I是电流，r_a是电流的‘出口’半径，R是‘入口’半径（见图7.14）。电磁力的数值相对较大（例如在钨极气体保护焊电弧中测得可达$0.02\times I^2$）并对电流有明显的依赖关系。在喷射过渡所要求的电流值上，这些力趋向于对过渡起支配作用。

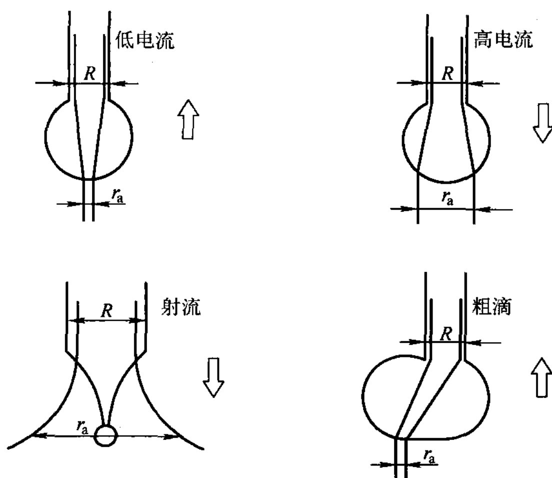


图7.14 各种过渡形式中电流路径的‘几何形状’

7.3.4 蒸汽喷射力

电流较大时，在电弧根部的熔化熔滴表面会产生显著的蒸发。蒸汽粒子加速进入电弧等离子体中会产生阻碍熔滴过渡的力。对于温度和成分均匀的平表面，可以证明这个力的数值为

$$F_v = \frac{m_0}{d_v}IJ \tag{7.5}$$

这里m_0是每秒每安培蒸发的质量，I是电流，J是电流密度，d_v是蒸汽密度。通常只有当电流较大或存在低蒸气压力元素时，蒸发力才会变得重要。

7.3.5 表面张力

在熔滴过渡中表面张力起到重要作用：在自由过渡中，它是主要的阻止熔滴脱落的力；在短路过渡中，它是把熔滴拉进熔池的主要的力。对粗滴过渡的下落-保持力进行简单静态分析表明，该力由下式给出

$$F_{st} = 2\pi r_w \sigma f(r_w/c) \tag{7.6}$$

这里 r_w 是焊丝直径，σ 是表面张力，$f(r_w/c)$ 是焊丝直径和毛细作用常数 c 的函数。对于大熔滴，这个等式的近似值为 $2\pi r_w$。

但是表面张力具体数值的计算是复杂的，这是由其显著的温度依赖性和受到某些表面活性元素显著影响造成的（如钢在其熔点温度时，0.1%质量含量的氧会使其表面张力降低30%，少量的硫在改变表面张力/温度梯度的作用已经在第6章中讨论过了）。采用 ϕ1.6mm 焊丝粗滴过渡时，对铝和钢计算出的表面张力数值分别是300dyn 和600dyn（$1\text{dyn}=10^{-5}\text{N}$）。

7.4 熔滴过渡现象小结

熔滴过渡现象可以分为自由过渡或短路过渡，在自由过渡形式中，还可以观察到几种不同类型。国际焊接学会制订了包含上述类型的熔滴过渡形式分类方法[115]，见表7.2。熔滴过渡形式受到力平衡的影响，这些力将取决于焊接过程的具体参数。重力、电磁力和表面张力是控制熔滴过渡的最重要的力。在传统熔化极气体保护焊中，这些力的水平和所获得的过渡特性是由系统的物理特性（材料和保护气体）决定的，但很大程度上受焊接电流控制。

表7.2 熔滴过渡形式分类（国际焊接学会分类修订版）[115]

熔滴过渡形式大类	小 类	举 例
1.0 自由过渡		
1.1 粗滴过渡	1.1.1 粗滴滴落	小电流熔化极气体保护焊
	1.1.2 粗滴排斥	CO_2 保护熔化极气体保护焊
1.2 喷射过渡	1.2.1 射滴过渡	熔化极气体保护焊在喷射临界电流以上
	1.2.2 射流过渡	中、高电流熔化极气体保护焊
	1.2.3 旋转射流	高电流，扩展伸出长度的熔化极气体保护焊，熔化极等离子弧焊
	1.2.3 爆炸过渡	手工电弧焊
	1.2.4① 喷滴过渡	临界电流（脉冲过渡）熔化极气体保护焊
2.0 接触过渡		
2.1 短路过渡		低电流熔化极气体保护焊

（续）

溶滴过渡形式大类	小　类	举　例
2.2　搭桥过渡		使用填充焊丝焊接
3.0　熔渣保护过渡		
3.1　渣壁过渡		埋弧焊
3.2　其他形式		手工电弧焊，药芯焊丝电弧焊

① 作者对 IIW 分类的修改[116]。

7.5　传统熔化极气体保护焊控制

如前所述，熔化极气体保护焊的平均电流决定了过渡机制，也控制着填充焊丝的熔化速度。

7.5.1　熔化极气体保护焊的熔化速度

熔化速度 *MR* 通常表示为

$$MR = \alpha I + \frac{\beta l I^2}{a} \tag{7.7}$$

这里 I 是电流，l 是伸出长度（图 7.15），a 是焊丝的横截面积，α 和 β 是常数。1.2mm 普通碳钢焊丝的 α、β 测量值分别是 $\alpha=0.3\text{mmA}^{-1}\text{s}^{-1}$，$\beta=5\times10^{-5}\text{A}^{-2}\text{s}^{-1}$；对于铝，$\alpha=0.75\text{mmA}^{-1}\text{s}^{-1}$，$\beta$ 忽略不计。这些数值中没有面积项，因为它们适用于固定焊丝直径。

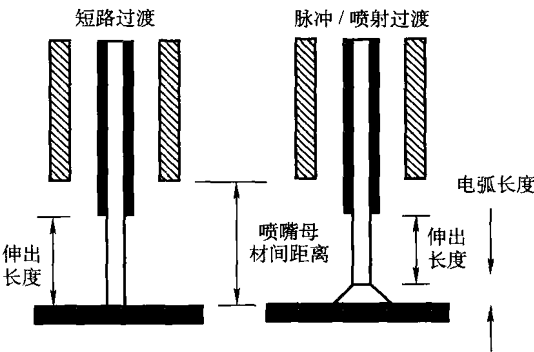


图 7.15　用来描述焊炬位置的词汇

式（7.7）中的第一项代表电弧加热作用，第二项是由电极的电阻热引起的。焊丝伸出长度电阻显著影响熔化速度，如图 7.16 所示[117]。伸出长度电阻

取决于电极直径/横截面积、电极电阻率和伸出的长度。DCEN（直流反接）会使熔化速度增大[118]，如图7.17所示，但一般难以保证电弧稳定性，同时这种模式下被焊材料的融化也不足。

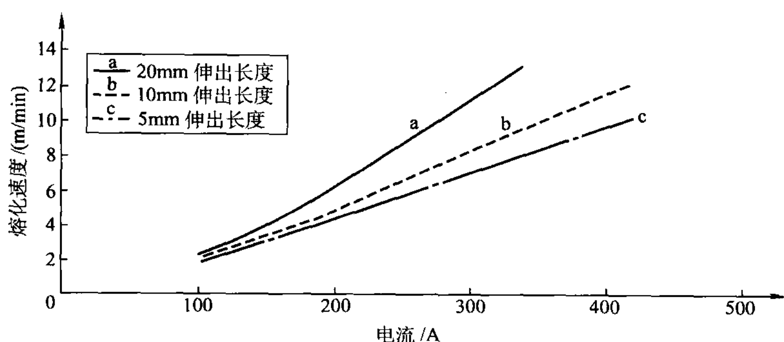


图7.16　焊丝伸出长度对熔化速度的影响（ϕ1.2mm钢焊丝，氩/5%的CO_2）[117]

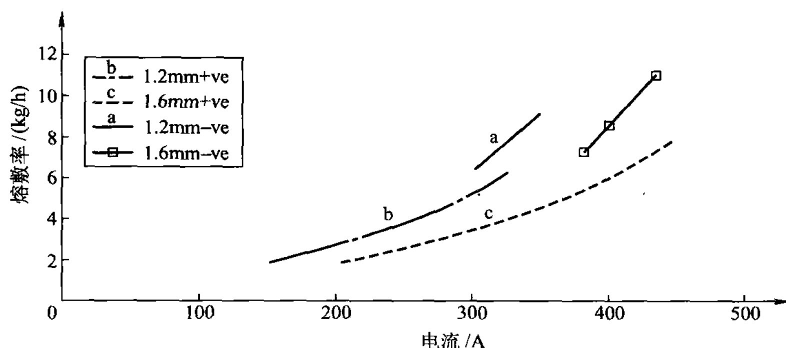


图7.17　极性对钢焊丝熔敷率的影响（$Ar/O_2/CO_2$混合气体）

如果极性和伸出长度固定，不论采用何种过渡形式，为了使过程能够稳定进行，送丝速度必须等于焊丝的消耗速度，即熔化速度（熔化速度这个词通常用于描述单位时间内电极材料消耗的质量。消耗速度一般指单位时间内消耗量（长度）或焊丝进给速度，有时熔化速度用于描述材料熔点等温线或固-液边界沿焊丝移动的速度）。由式（7.7）所给出的送丝速度和电流之间的关系，通常以图7.18所示的熔化曲线形式给出，根据这条曲线就可以选择适合于给定平均电流的送丝速度。

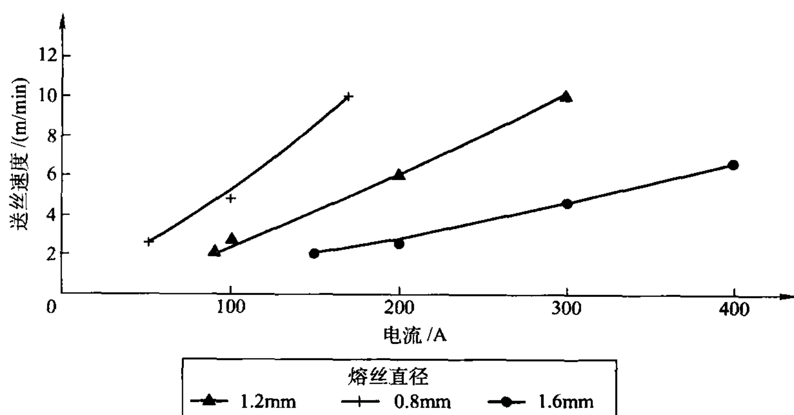


图 7.18 普通碳钢填充焊丝的消耗特性

7.5.2 电压-电流特性

在熔化极气体保护焊过程中，导电嘴末端与工件之间的电压是焊丝伸出长度上的电阻压降与电弧压降之和。由于电阻率的温度相关性和焊丝中陡峭的温度梯度，电极伸出长度电阻的计算是复杂的。在一定操作条件范围内总电压降的测量结果显示，熔化极气体保护焊自由过渡形式下的平均电流和电压之间的关系与钨极气体保护焊电弧的特性非常相似。在工作范围内，电弧电阻为正，当电弧长度固定时，对于任何保护气-填充焊丝组合，电压随电流线性增大。

在短路过渡时，平均电流-电压特性代表了短路电阻和电弧电阻的平均值，并遵循同样趋势。在短路和自由过渡时，平均电流和电压之间的关系可以通过下面的方程来表示：

$$V = M + AI \tag{7.8}$$

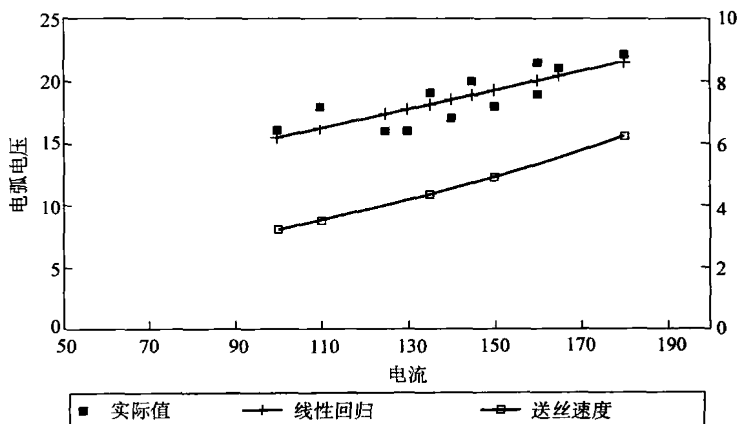


图 7.19 1.0mm 焊丝短路过渡

这里 V 是电弧电压，I 是电流，M 和 A 是常数。所得到的关系如图 7.19 所示。

7.5.3 传统熔化极气体保护焊系统中的控制

在传统送丝系统的设计中，送丝速度在所设定数值内保持恒定，而不考虑电弧特性的任何变化。为了提供自调节和保持电弧长度稳定，传统熔化极气体保护焊电源有时设计成恒压（CV）特性。在这类系统中，如果电弧长度有变化的趋势，电流会发生显著变化，熔化特性会起到阻止电弧长度变化的作用。电弧长度增大会导致电弧电压增大，电源的输出电流必须减小以满足电压提高的要求；由于熔化速度与电流有关，电流减小将导致熔化速度减小，这样由于焊丝消耗速度减小，因而电弧长度缩短，补偿出现的电弧长度增加。电弧缩短时，会使电流增大，熔化速度增大，电弧长度也会恢复到原来数值（图 7.20）。

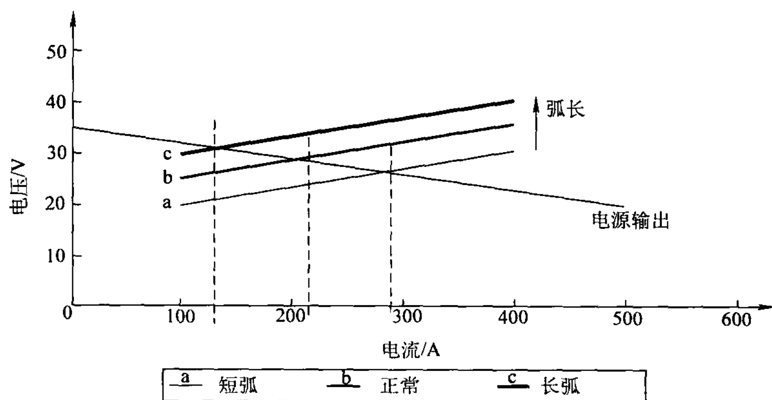


图 7.20 恒压电源的自调节作用

7.5.4 焊接参数选择：恒压电源

电流一般根据被焊工件厚度和所要求的焊接速度进行选择；送丝速度可以根据前面所述的熔化曲线来确定；电压的设置须提供所要求的电流并满足电弧电压-电流特性要求；工作点由电源和焊接过程特性曲线的交点决定，如图 7.21 所示。错误设置的实际效果会在电弧性能中反映出来。对于给定送丝速度，如果电压过低，会产生粘丝（粘丝是部分熔化的填充焊丝与工件之间产生的不希望发生的接触）。如果电压过高，会形成长电弧，最终填充焊丝返烧到导电嘴。

在传统熔化极气体保护焊设备中（例如，抽头式变压器-整流器设计），电压通过开关分级调节，它决定空载电压和短路电流，如图 7.22 所示。电弧电压必须根据对电源特性曲线静态斜率的了解进行估计。选择了电压后，最大短路电流就会自动确定，它是当电源输出被短路后（如短路过渡），电流所能达到的最大值。对于恒压特性电源，这个值可能很高，会导致短路的爆炸性破断和较大的

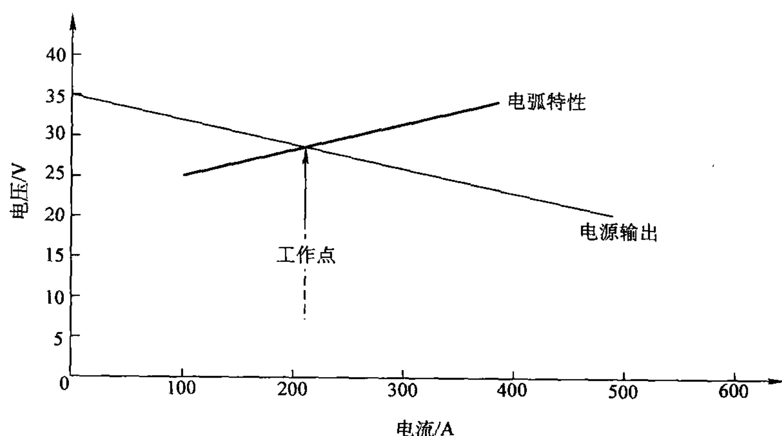


图 7.21 恒压电源的工作点

飞溅。为了限制短路电流，通常在电源的输出端引入电感，这将减小电流上升速度，并限制短路断开前的短路电流峰值。如果电感太大，电流不能上升到使熔滴脱落所需的数值，就会导致不规则过渡。因此在短路过渡方式中，应该对电压和电感进行调节以获得最佳的短路电流，并获得稳定、无飞溅的熔滴过渡。

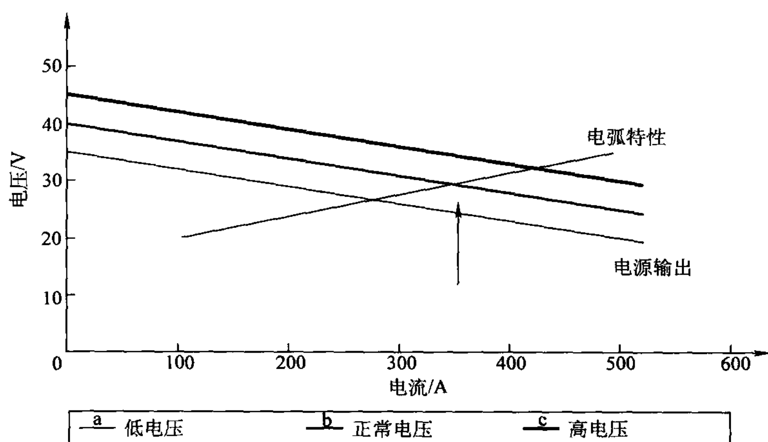


图 7.22 电源输出开关控制

7.5.5 可选择的控制技术

如果使用恒流输出电源，电弧电压的较小变化不会对电弧的加热作用（电流）产生影响。不仅如此，对于电阻性焊丝，固有自调节机制也会发生作用，如果电流和送丝速度固定，焊丝伸出长度‘l’值是唯一的，是由式（7.7）决

定。如果某种干扰使 l 暂时减小，式中的第二项也会减小，因此熔化速度减小，使伸出长度恢复到原值。遗憾的是，这种自调节作用在高传导性材料（如铝）中不会出现。

通过使用变速送丝装置，借助于调节送丝速度来响应弧长变化，恒流电源也可用于高传导性材料的熔化极气体保护焊。更为现代化的电源使用电子 AVC（电弧电压控制）系统来处理这个问题。目前这个领域的一些进展在7.7节进行介绍。

7.6 过程控制小结

在平均电流和送丝速度之间存在一个确定的关系，但在传统恒压源熔化极气体保护焊系统中，电流只能（通过设置送丝速度）进行间接设置。电弧电压、工作电流和最大短路电流一般由空载电压决定。在短路过程中电流上升速度及其峰值通过次级电感来控制。对于阻性焊丝可以使用恒流电源，但对高传导性焊丝，使用恒流源时还需要其他调节功能来消除过程波动。

7.7 熔化极气体保护焊方法的近期进展

熔化极气体保护焊方法的发展目标是控制熔滴过渡，提高过程稳定性，简化过程控制及增大操作裕度。先进电源的引入使得可以更详细地分析过程特性及改进控制系统。这一方法的操作范围也被扩大了，并引入了高熔敷技术来提高生产率。下面对此方面的一些进展进行讨论。

7.7.1 可控过渡技术

前面介绍的自然过渡方式有几个局限性，包括：

喷射过渡仅当平均电流超过临界电流时才会发生，而临界电流具有较高的数值。这限制了空间位置焊接能力的发挥或较薄构件的焊接。

短路过渡尽管特别适合于薄壁普通碳钢，但在有色金属材料的应用上则并非如此有效。

熔滴过渡控制方面的进步导致了脉冲熔化极气体保护焊和可控短路过渡的发展。

1. 脉冲熔化极气体保护焊

脉冲过渡的设计是为了使喷射过渡形式可以在平均电流低于正常临界电流条件下获得。采用较低的基值电流（如50~80A）来维持电弧，采用较高的电流脉冲来‘强迫’熔滴脱离（图7.23）。根据前面对熔滴过渡的分析，可以预期电流脉冲会产生很高的电磁力，连接熔滴的熔化金属会被压缩，从而使熔滴脱离

并穿过电弧喷射到熔池中。

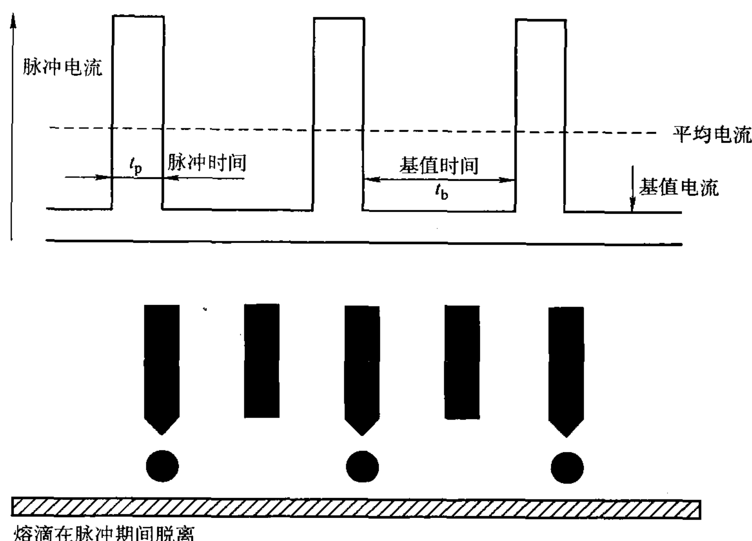


图 7.23　脉冲过渡

高电流脉冲在控制熔滴脱落和熔滴过渡中的应用已经有一段时间了，但由于早期脉冲熔化极气体保护焊设备的限制，低电流喷射过渡潜在的优点，即飞溅最小、空间位置控制更好等，并没有被广泛地认识到。早期脉冲熔化极气体保护焊电源的主要问题是它的固定频率（50～100Hz）操作、焊接参数确定和设置的复杂性。使用第 3 章所描述的电子电源，有可能产生变频率输出波形并优化熔滴过渡条件。

2. 可控熔滴脱离

使一个固定尺寸的熔滴脱离所要求的脉冲参数取决于焊丝直径、成分和保护气体的组合。脉冲时间 t_p 和脉冲电流 I_p 之间已证明存在如下关系

$$I_p^n t_p = D \tag{7.9}$$

这里 D 是常数（脱离常数），n 的值一般在 1.1 到 2 之间。I_p 的值总是在喷射临界电流以上，而基值电流 I_b 对熔滴分离的影响很小。由实验确定的值通常以图 7.24 所示的 I_p/t_p 曲线的形式给出。由实验确定的单个熔滴脱离的脉冲参数一般存在一个范围，从而形成工艺条件带形区，因此可以在此区域内选择多个参数值。

表 7.3 中给出了几种材料的 I_p、t_p 典型值。理想情况是，参数的选择使产生的熔滴与填充焊丝直径相似，尺寸与喷滴过渡的熔滴相似。

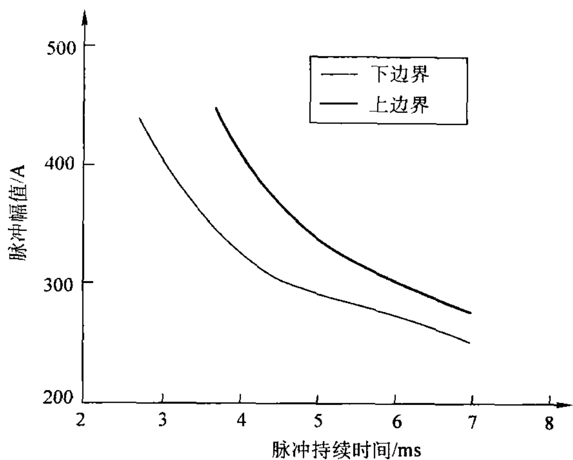


图 7.24 单熔滴、单脉冲的脉冲电流-脉冲持续时间之间的关系（ϕ1.2mm 碳钢焊丝，氩/5% 的 CO_2）

表 7.3 可控熔滴脱离的典型脉冲参数

焊丝直径/mm	几种常用材料的脉冲幅值 I_p/A 和持续时间 t_p/ms					
	普通碳钢		奥氏体不锈钢		铝合金	
	I_p	t_p	I_p	t_p	I_p	t_p
0.8	300	1.5	300	1.5		
1.0	300	2.0	350	2.0		
1.2	350	4.0	350	3.0	250	2.5
1.6	400	4.0			200	5.0

假设每个脉冲熔化的焊丝长度恒定，在脉冲频率和送丝速度之间可以定义一个简单的关系，设 W 为送丝速度，F 为脉冲频率，l_d 为每个脉冲下焊丝熔化长度：

$$W = Fl_d \tag{7.10}$$

矩形波的平均电流由下式给出

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \tag{7.11}$$

这里 I_m 是平均电流，t_b 是基值时间。由于熔滴脱离由脉冲幅值和持续时间控制，所以平均电流可以通过增加基值时间或减小脉冲频率而减小到远低于临界电流的数值。实际上，对 ϕ1.2mm 钢焊丝（临界电流≈240A），电流低至 50A 就可获得可控喷滴过渡。

采用上述的简单公式，就可以预先确定某个过程的工艺参数，如图 7.25 所

示。步骤如下：

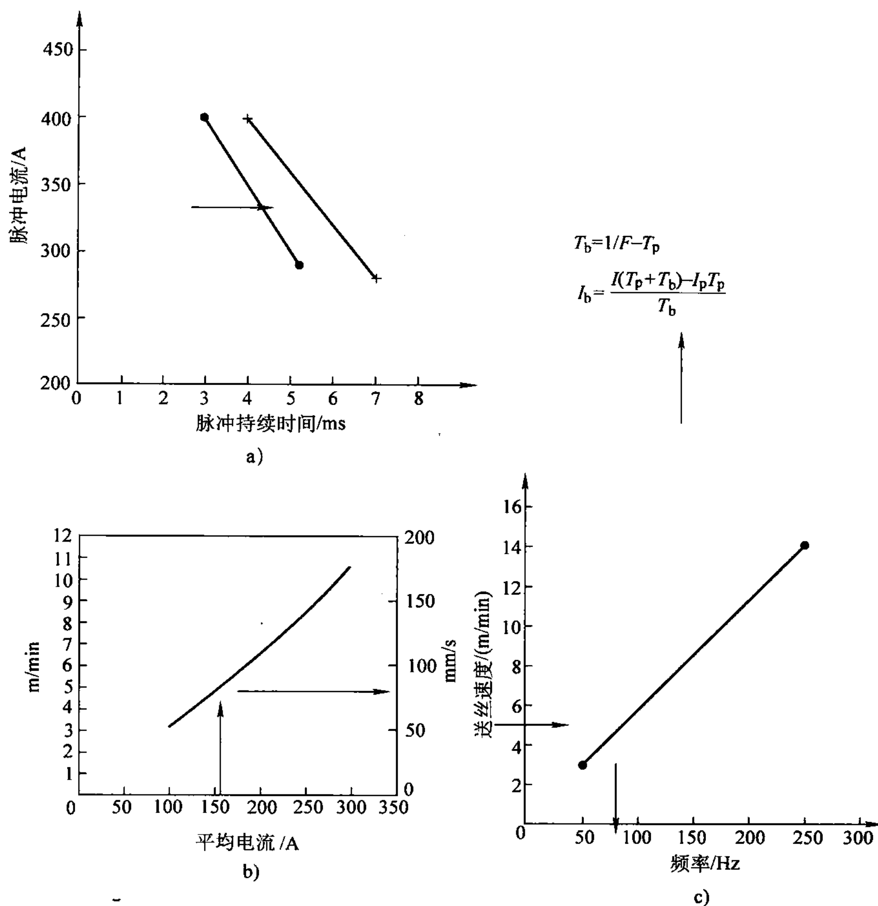


图 7.25　脉冲参数预测

a）脉冲参数　b）熔化速度　c）频率与送丝速度关系（1.2mm 焊丝，氩/5% 的 CO_2）

1）根据相应的过渡曲线或表格选择脉冲电流幅值 I_p 和持续时间 t_p。

2）选择合适的平均电流（I_m）。

3）根据所选焊丝的熔化曲线确定要求的送丝速度（W）。

4）根据送丝速度-频率曲线选择要求的脉冲频率（F）。

5）根据下式确定 t_b

$$t_b = (1/F) - t_p \tag{7.12}$$

6）根据下式确定 I_b：

$$I_b = \frac{I_m(t_p + t_b) - I_p t_p}{t_b} \tag{7.13}$$

通过这个步骤可以精确地确定工艺参数，但很费时间并枯燥乏味。但已经开发出计算机程序来解决计算问题，具有内置微处理器能够存储如上所述基本参数数据和公式的焊接电源的开发，还是极大地简化了焊接参数的选择和设置。这些技术的应用又促进了过程控制的发展。

3. 脉冲参数对熔化特性的影响

尽管可以大致认为，脉冲幅值和持续时间可以在式（7.9）的限制下变化而对熔化特性没有任何影响。但可以证明，采用高脉冲电流，熔化速度可能会显著增大。这是由脉冲期间电阻热增大引起的，熔化速度方程式（7.7）可以作如下修改[119]以考虑这种作用：

$$MR_p = \alpha I_m + \beta l\left(I_m^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 t_p t_b}{t_p + t_b}\right) \tag{7.14}$$

通过这个方程可以清楚地看出基值电流和脉冲电流之差的重要性。过电流 I_e（这里 $I_e = I_p - I_b$）的增大会引起熔化速度显著增大。钢焊丝的计算值和实测值如图7.26所示。

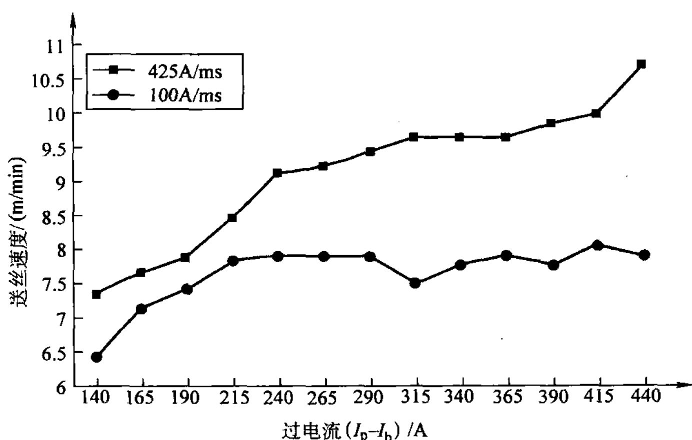


图7.26　脉冲参数对熔化速度的影响

在实际焊接条件下，对给定平均电流，使用高脉冲电流使熔化速度增大，可能会导致焊缝表面凸起、稀释率降低。已经证明[120]不同的电流变化率对熔化特性的影响方式相同；在平均电流相同的条件下，较高的电流上升速度会比较低的电流上升速度得到更高的熔化速度，如图7.26所示。对于 ϕ1.2mm 普通碳钢焊丝，当电流变化率（dI/dt）从 100Ams^{-1} 变化到 425Ams^{-1} 时，熔化速度增加10%。可以修改熔化速度方程以反映这种影响，这样式（7.14）成为

$$MR_{p} = \alpha I_{m} + \beta l\left(I_{m}^{2} + \frac{(I_{p} - I_{b})^{2} t_{p} t_{b}}{(t_{p} + t_{b})^{2}} - \frac{(I_{p} - I_{b})^{3}}{3S(t_{p} + t_{b})}\right) \tag{7.15}$$

这里 S 是转换速率 $= \mathrm{d}I/\mathrm{d}t$。

这些变化可以用来解释设计相似但动态特性不同的电源在性能上的差异。

4. 脉冲药芯焊丝焊接

对于药芯焊丝焊接，采用传统脉冲过渡技术几乎没有获得过成功，但采用第3章介绍的更灵活的可变波形电源，使得所有各种类型气体保护药芯焊丝都可以获得可控过渡。虽然脉冲的影响随焊丝类型而异，但如下现象已经得到确认[121]：

1）金属粉末芯焊丝与实心焊丝的特性很相似，脉冲可以提高空间位置焊接的表现与控制特性，同时焊丝还能进行合金化。如前节所述，对给定平均电流，如果选择适当参数，也可以增大熔化速度。

2）为获得可控过渡，钛型药芯焊丝所要求的参数稍有不同，但这些参数对于大多数商业化的先进脉冲熔化极气体保护焊系统都很容易实现。除控制熔化特性外，钛型药芯焊丝是否应采用脉冲技术不易确定，因为这种焊丝在一般的直流工作条件下性能也非常出色。

3）碱性药芯焊丝空间位置性能一般较差，熔滴过渡通常为粗滴过渡形式。但已经发现[122]，脉冲技术可以用来改进熔滴过渡和提高空间位置焊接的性能。对于碱性药芯焊丝，如下所述的电弧电压控制形式是必要的。

5. 可控短路过渡

如前所述，短路过渡是一个统计可变过程。每次短路过渡的焊丝量不能事先确定，并且它会影响燃弧时间和电弧加热。由于熔滴过渡量的变化使得在过渡过程中施加一个固定频率脉冲波形的尝试未能成功。因此，为了改进过渡特性，有必要动态地改变电源输出以便与过渡频率相匹配。

在对可控短路过渡最早的尝试中，其中一种是使用晶体管串联调节器电源为短路过程提供可控电流脉冲[123]。在短路过程开始时，启动预置短路电流；在短路断开之前，电流被迅速减小到电弧电流。短路的开始，通过测量瞬时电压来确定（当焊丝与熔池接触时电压降为接近于零）。短路之后，焊丝伸出长度的电阻热立即使短路电压增大，在临近断开之前的缩颈使其急剧增大。已发现，在电流增大之前需要有一个短暂的延迟以便在焊丝和熔池之间建立适当的接触（wetting in）。对 1.2mm 钢焊丝，这个延迟时间为短路开始以后 500μs。同样发现，在短路结束时，电压值必须足够低以便在短路断开前至少 50μs 时，使电流减小。这样所获得的过程比标准短路过渡更为规则，并且飞溅低得多。应该注意，在这种情况下，短路时间并不是固定的，而是随过渡过程的变化而变化。

这个早期方法主要的局限是难于可靠预测短路断开的发生时刻，但在 1980

年代中期，Ogasawara 等[124]设计了一种可靠的方法，通过检测短路电压的变化率而不是短路电压阈值来进行预测。同时对燃弧期波形也进行了改进，即施加一个具有适当幅值和持续时间的电流脉冲，以得到足够的电弧长度来避免过早的短路。在 1989 年，Stava[125]报道了另一种商品化电源，它进一步改进了短路破断的预测，并含有特殊设计的电路，能够在作出预测后非常迅速地切断焊接电流（在 50μs 内）。Ou 等[126]也介绍了用于短路过渡 CO_2 焊接的另一种方法，可以产生类似的电流波形，这个方法利用可编程电压-电流特性而不是基于时间的波形，这使得电源对过程的自适应能力更强，也更有利于‘单旋钮控制’设备的实现。

Cuiuri 等[127]介绍了可控短路过渡的进一步的发展。在这一研究中，可以在燃弧期间获得最佳的熔滴尺寸，而在短路过程中峰值电流被限制在较低水平。如果在燃弧期间形成了足够大的熔滴并获得了有效的润湿，则熔滴被表面张力拉进熔池，不需要大的短路电流。这个方法不需要预测短路的结束时刻，也不需要在短路结束之前进行电流大小转换。这种方法所用电流波形如图 7.27 所示。

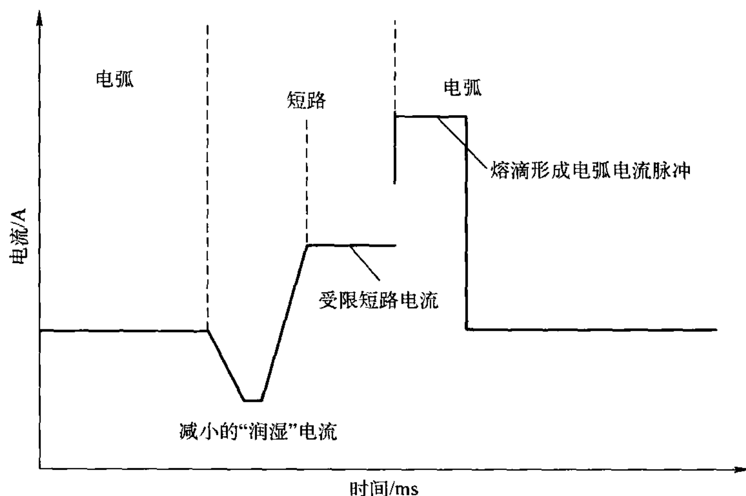


图 7.27　理想的短路过渡波形（单个短路）

以上所介绍的这些进展都致力于控制电源输出电流以获得所要求的过程特性，而送丝速度恒定。研究者也使用机械方法快速调节送丝速度以改进过程特性，而不求助于复杂的电源。早期的试验采用单向分极送丝速度[128~130]。这个方法使用分极送丝速度来规定短路频率。其后，Huismann[131]详细介绍了一种动态送丝系统，在短路开始时它能迅速使焊丝回抽。在这个系统中，短路频率不是强制的，送丝控制系统仅需对短路的发生作出响应。电极的回抽保证了短路破断即使在低电流、粗焊丝条件下也可以成功进行，而对熔池的扰动最小。电弧一旦

在短路之后重新建立起来，焊丝就以所要求的送丝速度送进。

这些技术使过渡过程稳定性，特别是 CO_2 气体保护焊的稳定性得到了提高，另外焊接过程的熔化特性也能被更有效地控制。

7.7.2 单一旋钮和程序控制

在传统直流和脉冲熔化极气体保护焊中设置焊接参数的复杂性促进了具有‘单一旋钮’控制的设备的研制，这可以追溯到1968年[132,133]。这些系统通过单一控制对预置焊接参数组合进行选择（如送丝速度/平均电流和电压）。遗憾的是，这些系统受到当时电源技术的限制，特别是受保护电源电压波动下非电子设计困难的限制，还有产生能够适应各种应用场合的有限数量的‘理想’焊接参数的问题。随着电子功率调节器件和微处理器控制的引入，这些问题中很多已经解决了。能够提供大量预定焊接参数、允许用户记录和提取他们自己定制的参数的可编程设备，目前也都进入了应用领域。

更进一步的发展是将上面所介绍的算法引入控制系统中，以使得在宽广的范围内通过单一控制可以对输出进行连续控制。这个技术最初是为脉冲熔化极气体保护焊开发的，称为协同控制。

1. 协同控制

尽管脉冲熔化极气体保护焊的最佳焊接参数可以通过前述步骤进行精确预测，但如果需要改变平均电流，必须重新计算控制参数并重新设置焊接参数。这将带来严重的实际问题，包括产生误差的可能性和工作性能的恶化。幸运的是，可以将预置参数和控制方程同时存储在设备中，使输出能够自动调节以响应单一输入信号。这种系统即为协同控制[134]。其定义[135]如下：

协同控制是指这样的系统（开环或闭环），它可以修正一个重要的脉冲参数（或相应的送丝速度），在一定的送丝速度（或平均电流水平）范围内可以保持平衡状态。

在一个典型的协同控制系统中，单个熔滴脱离的脉冲持续时间和幅值（从实验得出或由式（7.9）导出）是预置的。这个系统可能含有一个测量送丝速度的转速计，并将速度信号反馈给控制电路，以便由控制电路产生合适的脉冲频率。这样，根据式（7.10），可以自动保持送丝速度和熔化速度之间的平衡。当送丝速度变化时，不论是有意的还是意外的，焊接条件都会进行调节以保证稳定性。平均电流通过式（7.11）给出的脉冲参数来确定，系统如图7.28所示。

这种控制技术的主要优点是通过单一控制可以在一个宽广的范围内连续调节平均电流（如采用 ϕ1.2mm 碳钢焊丝时电流范围为 50～300A），并且在整个控制范围内，可以保持稳定的射滴过渡。目前很多商品化系统都省去了直接送丝速度反馈，而是依赖于电子电源和送丝速度调节的内在精确性和稳定性。

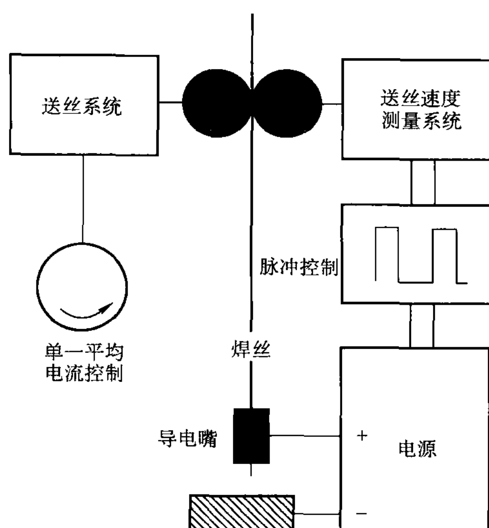


图 7.28 协同控制

2. 协同控制的发展

协同控制技术通过以下几方面得到进一步加强：

改进的控制策略。

弧长控制。

由用户选择参数。

短路和直流喷射过渡的协同控制。

1）改进的控制策略。尽管这些系统仅要求单一调节，但一般还会含有一个微调控制来适应电弧行为的微小偏差。该微调控制通常用来调节送丝速度和脉冲参数之间的关系，改变熔化特性，增加或缩短电弧长度。系统能允许操作者选择适合于特定应用的电弧条件或修正控制算法中的缺陷。

这种系统采用三种基本控制策略。在初期协同控制系统中，采用图 7.29 所示类型的电子电路，增大送丝速度的作用是增加脉冲频率、基值电流和脉冲高度。脉冲持续时间固定不变。这可以通过图 7.30 进行说明。在宽广的电流范围内该系统都具有令人满意的性能，但单个熔滴脱离的脉冲电流最终将超过由式（7.9）（$I_p^n t_p = D$）所确定的值，此时控制作用失去。

另一种系统保持脉冲电流、基值电流幅值及脉冲持续时间不变，只改变频率来响应送丝速度的变化。在这种情况下，‘理想的’脉冲参数是固定的，但随频率上升，基值电流持续时间减小，基值电流对焊丝尖端的预热作用减小，这可能使得熔滴尺寸减小，同样将限制有效控制范围。

第三种技术是固定脉冲电流和幅值，而使频率随送丝速度变化，但为了消除

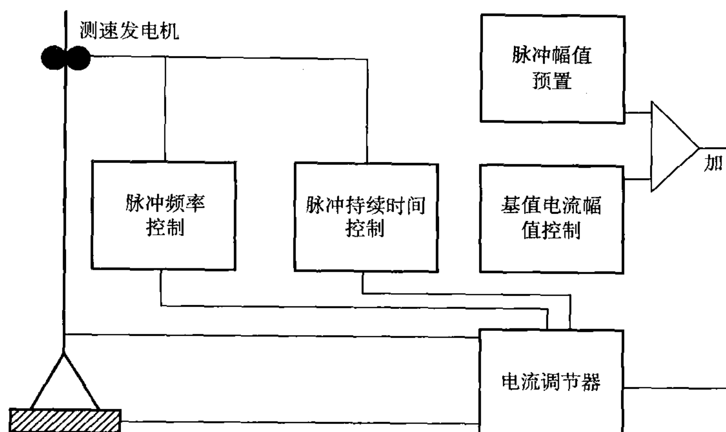


图 7.29　协同控制的初期控制方案

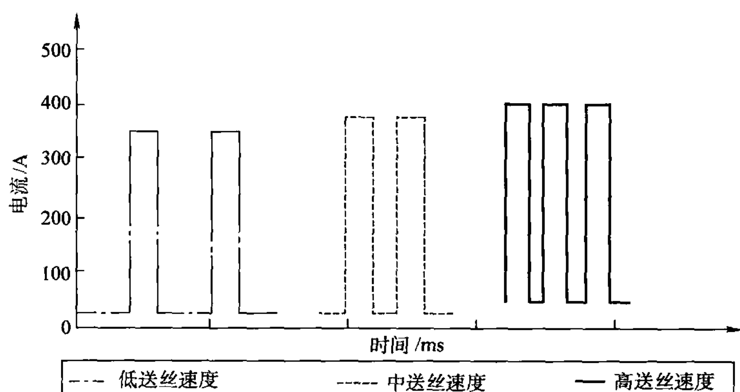


图 7.30　初期协同控制系统增大平均电流和送丝速度的作用

基值时间变化的影响，基值时间和基值电流的乘积保持不变，即

$$I_p t_p = B \tag{7.16}$$

该控制策略使操作范围扩大，并由于平均电流/送丝速度的调节而将微调的需要减至最小。

微处理器的引入使得可以应用更复杂的控制策略，例如可以采用随电流变化改变控制算法的非线性方法。通常会发现，上面所介绍的系统对大多数应用都可以给出合适的性能。

2）弧长控制。由于恒压电源具有所要求的自调节能力，因此其在传统熔化极气体保护焊中的应用是合适的。由于不希望有电流波动和在脉冲和可控短路过渡中需要预置电流等需求，导致了恒流电源在这些过程中的应用。在理想条件

下，用这些改进的控制方法所获得的规则的熔化特性应保证弧长恒定。但送丝速度的瞬时波动、短路过程中的电接触、工件表面状况以及焊炬的移动都会引起与理想状态的偏差。对于工作于恒流条件下的电阻性焊丝，如钢焊丝，由于焊丝伸出长度变化导致电阻变化，可以获得一定程度下的弧长固有调节作用。对于固定的电流和送丝速度，存在一个由式（7.7）确定的唯一（平衡的）伸出长度值。伸出长度增大会使电阻增大，从而增大熔化速度使伸出长度恢复其原值。遗憾的是，对于低电阻率焊丝如铝，电阻对熔化速度的作用可以忽略，这种机制不起作用，弧长的瞬时振荡可能造成短路或弧长过长。为了解决这一问题，采用了各种动态控制方法。这些方法通常是基于系统中电压降的测量，因此称为弧压控制或AVC系统。即使对于非电阻性焊丝，恒流电源的输出电压随弧长变化，这样就可以通过改变如下参数之一来修正熔化速度的改变：送丝速度、脉冲频率、脉冲高度或持续时间。

调节送丝速度也可能有效，但由于送丝系统的机械惯性，其响应速度较低，容易形成过补偿。

脉冲频率可以在一个脉冲周期内得到调节，并且比调节送丝速度更为精确，这种方法在很多系统中得到应用。在某些系统中，为了获得更有效的控制，基值电流与脉冲频率同步增大。

为响应电弧电压变化，脉冲高度的调节方法是：在脉冲期间采用由电子电路产生的恒压特性；在基值期间采用恒流特性。该技术采用与前述传统系统相同的自调节机制。在这种模式中，最佳条件通常是使用由式（7.9）所定义的高电流、短时间参数来获得，因为这些参数对电流变化不敏感（图7.31）。应用这种系统，平均电流不可避免地存在一定程度的变化，但由于恒压时间仅为整个脉冲周期的一小部分，电流仍会在低平均值条件下保持相对恒定。

3）用户选择参数。如第3章，所述传统熔化极气体保护焊设备可能安装有

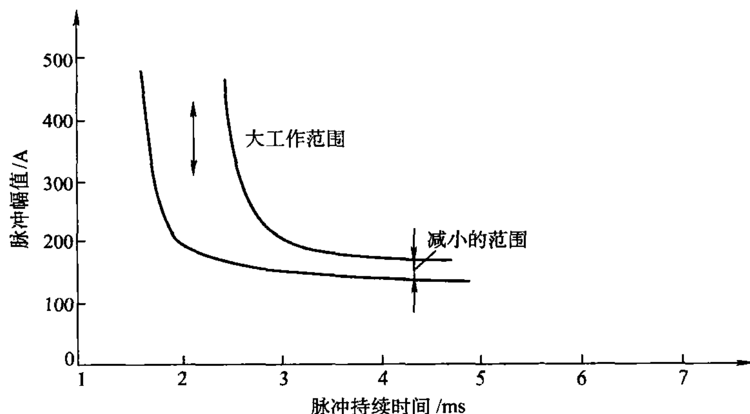


图7.31 熔化极气体保护焊电源脉冲工作范围

电气的、电子的或基于计算机的系统来存储 5 ~ 100 套用户定义参数。

在早期协同控制的熔化极气体保护焊设备中，脉冲参数和控制算法由生产商预置。这使应用范围仅限于厂商编制过的程序的情况，而不能用于新材料或特殊应用条件。后来的设备在可编程只读存储器（EPROM）中含有程序数据，生产商可以对电源进行定制以满足用户要求。在这方面最新的进展是为用户提供一些编程条件。比如在某些设备中，用户可以为一种特定材料设置脉冲电流和持续时间，使用内嵌的协同控制策略在宽广的电流范围内实现自动调节。另外一种系统使用户能够通过便携式计算机为一种‘新’材料预先确定理想的脉冲参数，然后通过数据传输通路将这些参数传输到设备中。特定的用户定义程序存储在非易失性 RAM 中，可以在任何时间被修正或调用。

4）短路和直流喷射过渡的协同控制

随着近期更复杂系统的开发，可以认为早期单旋钮熔化极气体保护焊系统[136]具有与协同控制相同的特点，但通过把上述概念推广到传统短路和喷射过渡的直流焊接中，已经发现有可能[137]产生更灵活的协同控制系统，可以在任何过渡方式下工作。

3. 协同控制系统

以上所介绍的可控过渡技术和协同控制技术现在已经引入到了很多焊接电源中。为了获得所要求的电源特性，有必要使用电子功率调节器，一般是采用微处理器控制。针对焊接过程模式的要求，会要求操作者选择一个初始设置，如填充焊丝类型、焊丝直径和保护气体。基于此输入信息，设备加载电控制参数和控制算法，唯一要求用户所做的是选择适用于该工况的平均电流。

7.7.3 扩展操作和高熔敷率焊接

上面介绍的大多数技术扩展了熔化极气体保护焊的能力，改进了对焊接过程的控制，此外还有关于提高熔敷率的研究也有报导。熔化极气体保护焊的高熔敷率依赖于直流反接操作模式、高工作电流、增加伸出长度或这些因素的联合使用。早在 1955 年[138]就已经了解到熔化极气体保护焊反接可以在喷射过渡方式中使焊丝熔化速度增大 50%[139]。问题是当采用 DCEN 时，钢焊丝的特性有些不规律。为了解决这个问题，Lesnewich 使用了表面活性剂，而 Norrish 采用了以氩气为基的混合气体。尽管这些技术还没有在实心焊丝上得到商业化应用，但已经在金属芯药芯焊丝高熔敷率焊接中得到应用。

熔化速度与电流之间的关系前面已经给出（式（7.7））。如果进一步研究这个关系并考虑填充焊丝的横截面积（a），可以看出，增大焊接电流或焊丝干伸长或减小焊丝横截面积都会使熔化速度增大。在 1970 年代，美国联合碳化物公司的研究者证明，当焊接条件为：1.2mm 焊丝、35mm 的干伸长、350A 的电流、

基于氩气的混合保护气体，熔敷率增大30%。Halmoy[140]也指出，对于同样的焊丝直径和350A电流，当伸出长度从25mm增大到35mm时，熔敷率会从120g/min增大到180g/min。如果电流进一步增大，熔化速度也会增大（与电流的平方成正比），伸出部分熔化，旋转喷射过渡产生。这个技术已经商业化了，名为T. I. M. E. 和Rapidmelt[141]。尽管在基于氩气的保护气体中焊接过程令人满意，氦还是经常被加入到混合气体中来促进母材的熔化。

高生产率熔化极气体保护焊最新的进展是多丝系统的应用。一般采用两根焊丝共用一种保护气体或采用两个邻近焊炬。两根焊丝可采用同一个电源或各自采用独立电源。Blackman[142]曾对操作方式进行了分类并对这种方法的优点进行了论证。据报道熔敷率可高达24kg/h，并且该方法具有抗咬边能力。

7.8 本章小结

以上对熔化极气体保护焊的发展所进行的讨论说明，通过这些方法可以提高焊接过程的可靠性，并简化原本会非常复杂的控制要求。很重要的一点是：为某一具体应用选择一种适当的熔滴过渡技术仍然是必要的。协同控制技术提高了设备的易用性的同时，它们并不会改变过渡方式的基本特点。

另外，熔敷率的提高可以通过直流反接操作模式、增加焊丝干伸长的电阻热或多丝技术来实现。

第8章　高能密度加工方法

8.1　引言

随着高能密度加工方法的发展，等离子束、电子束和激光等技术被广泛应用到了工程材料的焊接加工领域。图8.1是各种焊接方法的能量密度对比图。可见，在通常情况下，等离子束、电子束和激光的能量密度都大于$10^9 Wm^{-2}$，远远高于传统电弧焊过程中电弧的能量密度。由于能量高度集中，焊接过程中熔池的形成机理和普通熔化焊相比有明显的不同：焊缝区域的材料被迅速加热到很高的温度，甚至引起材料蒸发，在热源的正下方形成很深的孔洞。孔洞后方的金属因为热传导作用而熔化，随着热源的前进，液态金属注入孔洞并冷却凝固形成焊缝。这种技术在工程上被称为穿孔型焊接技术，其焊接原理如图8.2所示。

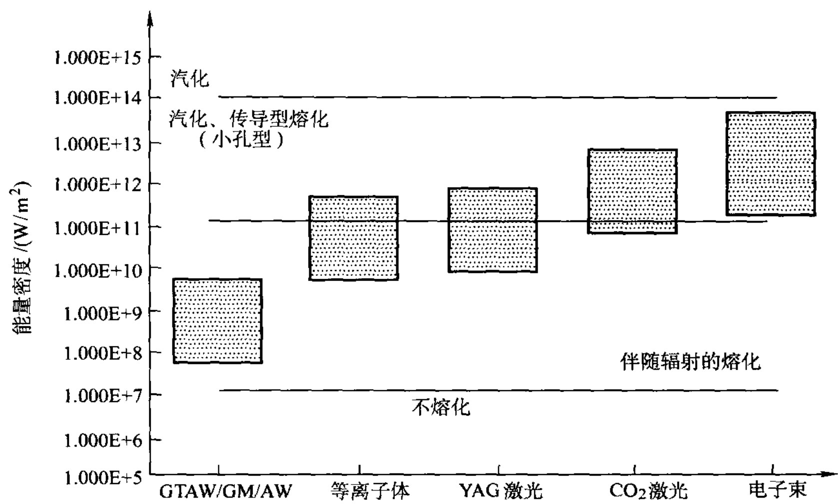


图8.1　各种焊接方法的能量密度对比

焊接过程中能形成穿透工件的“小孔”的高能密度焊接方法有以下一些特点：

1）通常只能应用于对接焊。

2）对接接头在焊前装配时要求紧密贴合。

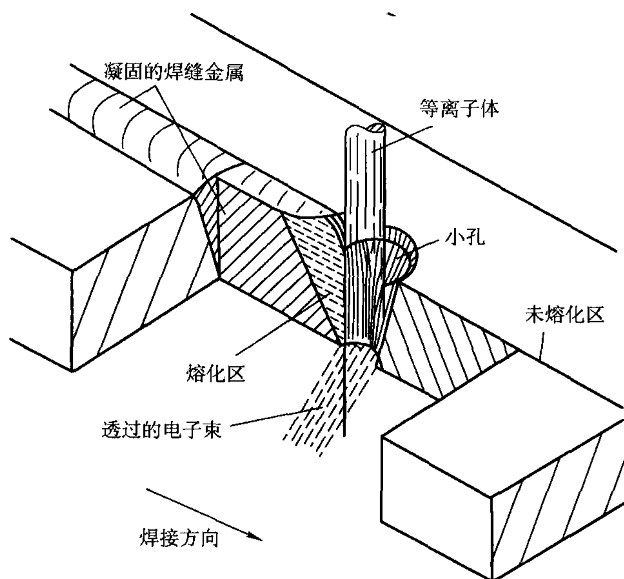


图8.2 穿孔型焊接的原理

3）焊缝的横截面上要求有较高的深宽比。

4）具有足够的熔深，能够实现单面焊接双面成形。

5）可以减小结构的焊接残余变形，并削弱热作用对母材性能的影响。

穿孔型焊接过程中，非常稳定的焊接条件，特别是稳定的高能束移动速度，是形成“小孔”的作用力（如气流速度、金属的蒸汽压力和反冲力）和封闭小孔的作用力（如液态金属的表面张力和重力）之间保持平衡的关键因素。另外稳定的焊接速度和完善的安全保护措施也是实现自动化焊接的必要条件。

尽管上述的三种高能密度的焊接方法有共同的作用原理，并且焊接过程有很多相似之处，但它们都有各自独有的特点和应用领域，这些都将在后文中仔细讨论。

8.2 穿孔型等离子弧焊

等离子弧焊的原理在第六章中已经做了详细阐述。如第六章所述的转移弧模式被用于穿孔型等离子弧焊接，只是焊枪喷嘴的孔径更小，并且焊接电流和等离子流速都大大增加。等离子弧焊过程中，产生穿孔效应所需要的电流取决于喷嘴的几何结构、被焊材料的种类和厚度。一般情况下，喷嘴孔径在2～3mm范围时，相匹配的焊接电流大于200A，等离子流速达到3～4L·min^{-1}。在这些因素

的影响下，电磁收缩作用使得等离子束具有更高的能量密度。

等离子弧焊过程中的热量利用率很高，文献［145］中的研究显示当采用功率为10kW的等离子束进行焊接时，转移到焊件上的热量达到了总热量的66%以上。

8.2.1 穿孔型等离子弧焊的控制

穿孔型等离子弧焊中各焊接参数之间的关系因受到喷嘴结构的显著影响而变得非常复杂，使用某一特定喷嘴所确定的焊接参数并不能直接应用到其他设计形式的喷嘴上。穿孔型等离子弧焊的控制变量被分为两大类：一类是在焊接过程中为满足应用条件而可以调节的变量，被称为主要控制变量；而另一类变量通常是在焊接前就已经选定的，称为次级控制变量，如表8.1所示。

表8.1 穿孔型等离子弧焊参数

主要控制变量	次要控制变量
电流	喷嘴形状/类型
焊接速度	喷嘴孔径
等离子气流量	电极顶角
	电极缩入量
	保护气和等离子气种类
	焊炬位置

1. 主要控制变量

（1）平均焊接电流　磁场收缩引起的电弧力和平均焊接电流的平方成正比，随着焊接电流增加，电弧力随之增大。但是电流增大以后，也可能产生咬边或焊瘤等缺陷（第六章中有相关介绍），因此，在等离子弧焊过程中焊接电流必须和焊接速度相匹配才能形成良好的焊缝。

（2）等离子气流量　等离子气流量的大小之所以能对等离子弧焊造成影响，关键在于焊枪喷嘴内有一层未等离子化的绝缘气体包围在等离子束的周围。当焊接电流过大、等离子气流量太小或者冷却不够充分的时候，这层绝缘气体会遭到破坏，从而导致出现双弧（双弧是指在电极与喷嘴间或喷嘴与工件间形成了第二个电弧），并对喷嘴造成严重损害。除此之外，等离子气流量还对电弧力产生影响，如果流量过低，则可能在焊接中得不到“小孔”效应。因此，在焊接电流较高的情况下，为得到良好的焊缝，应适当提高等离子气流的流量，但同时咬边现象的出现和热效率的降低决定了气流量的上限。

（3）焊接速度　焊接速度太慢会造成“小孔”的尺寸过大，不能形成稳定的熔池，最终致使焊缝陷落，但焊速过高时又会引起咬边或是未焊透等焊缝缺

欠。因此，穿孔型等离子弧焊过程是由平均焊接电流、等离子气流量和焊接速度三个参数共同决定的。图8.3显示了不同的等离子弧焊功率㊀条件下熔深和焊速之间的相互关系。考虑到这些数据取自来源不同的几个独立文献[146~148]，因此图8.3的结果表现出了惊人的一致性。本书附录6中列举了一些常见工程材料采用穿孔型等离子弧焊时的工艺参数。

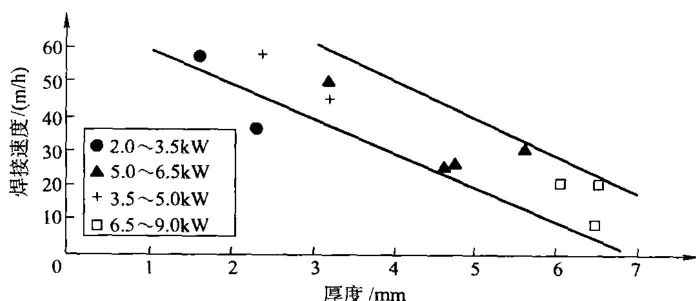


图8.3 利用不同功率水平的等离子体采用穿孔型焊接方式焊接不锈钢过程中焊接速度和接头厚度的关系曲线

2. 次要控制变量

1）喷嘴孔径。减小喷嘴孔径可以增加电弧力和电弧电压。一般来说在穿孔型等离子弧焊中选用小尺寸的喷嘴，其孔径约为2~3mm。

2）电极形状。电极形状和它在焊枪中的位置是一个关键因素，因其可以影响焊枪中的气流量。文献[149]中的研究结果建议电极在焊接过程中的位置公差应该控制在0.1~0.2mm之间。电极在焊枪中的同心度对焊接过程也有显著影响，任何位置上的偏差都会导致电弧分布不对称和焊缝质量下降。电极在焊枪中的位置可以通过焊枪中的陶瓷套进行调节或固定。

3）多头喷嘴。多头喷嘴可以用来增强电弧收缩，并且改变等离子弧柱的形状，使它在焊缝方向拉长成为椭圆形。近期的研究结果[150]显示：使用具有两个同心喷嘴的焊枪可以提高电弧压力，但是等离子气流量的过分增加可能降低热效率。

4）保护气体。等离子弧焊中最常用的保护气体和等离子气都是氩气，但是在焊接低碳钢和奥氏体不锈钢时可以添加1%~5%的氢气㊁，这些少量添加的氢气可以起到非常明显的效果，能够增强电弧收缩、减少焊接夹杂和提高焊接速

㊀ 等离子弧焊功率定义为平均电流和电压的乘积，电压包含了所有次级参数对焊接过程的影响，因此是一个非常重要的量。等离子弧焊的功率很好地说明了穿孔型等离子弧焊方法的能力。

㊁ 如果焊接过程中具有裂纹，为避免氢脆或气孔倾向，则严禁添加氢气。在焊接高合金钢、钛合金、铝合金等时也应避免添加氢气。

度。对于铜和铝等传热性能良好的材料，等离子弧焊过程中也可以用氦气作为保护介质，这样虽然会降低焊弧的稳定性并使电弧发散，但增加了总的焊接热量，使得焊接过程中可以达到“小孔”的形成温度。文献报导[151]，当保护气体选用30%的氦气+70%的氩气（未注明的气体成分百分比体积分数，后同）的混合气体焊接铝合金时，实现穿孔型焊接的焊接速度比单纯用氩气作保护气时的高出66%。尽管在焊接过程中要求有足够的保护气体将焊接区域覆盖，但实际上对保护气体的流量要求通常并不非常严格。

3. 电弧特性

电弧收缩会导致电弧电压的升高。在等离子弧焊过程中，增加等离子气流量，减小弧柱直径，提高焊接电流以及向等离子气中混入氢气或是氦气等操作都会导致电弧电压的升高。电弧压缩作用的效果示于图 8.4 中。等离子弧横截面上的温度分布一般遵循高斯分布规律，如图 8.5 所示。

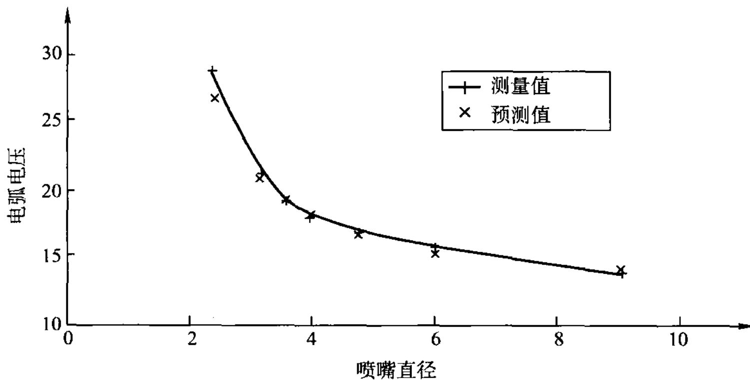


图 8.4 等离子弧焊：喷嘴直径对电弧电压的影响（理论方程为 $V=19.55/r^2+13.18$（r 为喷嘴半径））

4. 反极性等离子弧焊

等离子弧焊通常采用直流反接，即电极作为阴极而工件作为阳极，但是在焊接铝合金的过程中也可以采用直流正接，可以起到去除工件表面氧化膜的作用，称为“阴极破碎”或者“阴极雾化”现象。直流正接会导致电极温度过高，为了防止电极熔化通常需要采取增加电极的尺寸和限制最大焊接电流等措施，但这些措施又会导致焊缝的熔深变浅。因而在直流正接的等离子弧焊中也可以采用氦气作为保护气体增加熔深，它可以使穿孔焊接模式下的熔深增加到 8mm。

5. 变极性等离子弧焊

通过使用如第三章中介绍的变极性电源，可以获得综合了等离子弧焊直流正接和直流反接两种方法的优点模式。采用这种模式焊接铝合金获得了优异

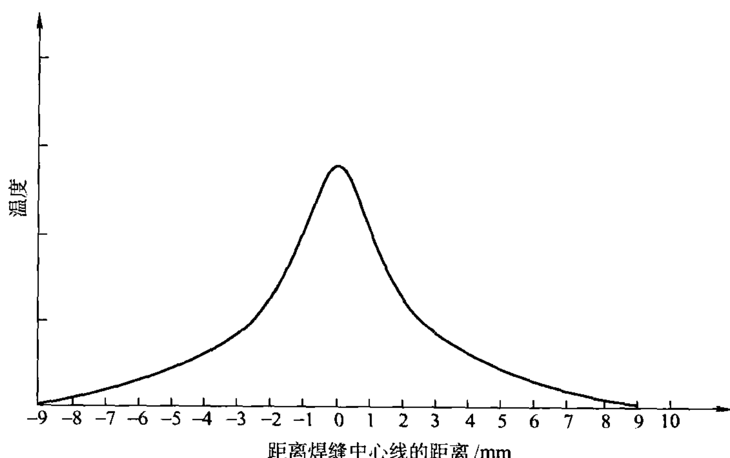


图 8.5 等离子弧作用于工件表面时的温度分布

的结果。

6. 脉冲穿孔型等离子弧焊

根据上文的讨论，正常情况下穿孔型等离子弧焊只能用于平焊过程，并且对焊接速度的控制有比较严格的要求。通过修正焊接电流的波形可以提高其工艺裕度，并且可以针对更广泛的材料和板厚实现多种位置的焊接[152,153]。在焊接过程中电流按照较低的频率变化，根据实际要求调节脉冲的持续时间和振幅，以满足形成“小孔”的要求。基值电流设置为既能满足电弧稳定燃烧的需要，又能够在此期间使熔池凝固。脉冲穿孔型等离子弧焊的焊缝由一连串相互重叠的焊点组成，为保证焊缝质量，一般通过调节焊接速度使相邻两个焊点达到60%以上的重合。脉冲穿孔型等离子弧焊可以很好地控制“咬边”等缺欠，从而得到宽而且表面平整的焊缝。下文将通过举例介绍直流和脉冲型穿孔等离子弧焊的特点和应用。

7. 应用

等离子弧焊在穿孔模式下焊接使得10mm厚对接接头的单面单道焊接成为可能。

（1）碳锰铁素体钢　穿孔型等离子弧焊方法焊接碳锰铁素体钢最近已经开始应用于电力和海洋工程方面的环形焊缝钢管的制造。对于厚度为6～8mm的管体可以实现单面单道焊接一次成形，极大地提高了生产效率。脉冲穿孔形等离子弧焊也用于上述研究中，以提高工艺裕度和全位置焊的焊接质量[154]。

（2）奥氏体不锈钢　穿孔型等离子弧焊技术可以很好地焊接奥氏体不锈钢，目前它主要用来焊接管道上的纵焊缝以及一些在低温条件下使用的部件[155]。利

用穿孔型等离子弧焊焊接 2.7mm 厚的奥氏体不锈钢接头，焊速可高达约 1m/min，而接头厚度为 6mm 时，焊接速度约为 0.35m/min。在保护气体中加入氢气或使用混合好的约含 1% ~5%（体积分数）氢气的混合气体可以起到改善焊缝表面状态和提高焊接速度的作用。焊接过程中通过仔细调整工艺参数一般可以限制咬边现象的出现，如果控制效果不理想，则可以采用脉冲等离子弧焊或是采用表面堆焊等方法进行修复。

（3）镍基合金　大量的镍基合金（包括 200、400、600 系列合金，Hastelloy C，Inconel718 等）都可以采用穿孔型等离子弧方法焊接，理想的接头厚度在 2.5 ~7.5mm 之间。其中焊接 200、600 系列镍基合金时，作为等离子气和保护气的氩气中需要添加 5% 的氢气。利用 160A 的电流焊接 3mm 厚的镍基合金时，焊接速度可以达到 0.5m/min，而用 310A 的电流焊接 8.25mm 的厚板时，焊速下降到 0.22m/min。

（4）钛合金　直流和脉冲穿孔型等离子弧焊目前已经广泛应用于钛和钛合金的焊接，在气体保护充分的条件下，可以得到高质量的焊缝。为实现对焊接过程的充分保护，一般钛合金的焊接都在先抽真空然后充入氩气的箱体中完成，或者采用如图 8.6 所示的卧式气体保护装置。钛及钛合金焊接的最大问题在于咬边现象严重，可以采用下面的一些措施进行控制：

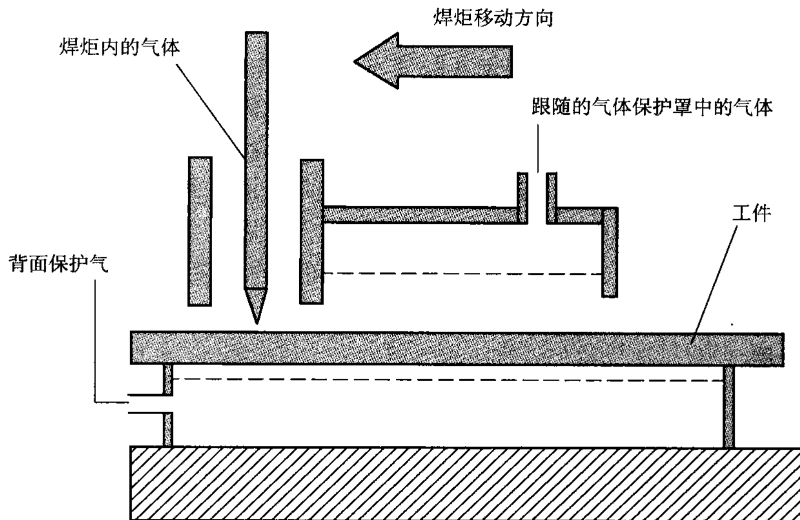


图 8.6　“跟随型”气体保护装置

1）对于厚度小于 3mm 的接头仔细选择焊接参数。

2）对于脉冲等离子弧焊，每个脉冲都进行电流衰减控制。

3）利用等离子弧焊或是钨极氩弧焊添加填充金属对焊缝进行修复。

4）使电弧的磁偏吹方向和焊缝方向重合。

本书的附录7给出了利用穿孔型等离子体焊焊接金属钛的典型工艺参数。

（5）铝合金　在穿孔型等离子体焊接中，如果用电极作为阳极（直流正接），可以实现铝及铝合金的焊接。也可以采用先进的大功率变极性等离子弧焊来焊接铝合金，可以显著改善焊缝质量[158]。研究发现，在焊接过程中，保持一个电流周期中15～20ms是直流反接，而2～5ms为直流正接，可以获得高质量的焊缝。

8.2.2 小结

穿孔型等离子弧焊接方法可以用来焊接多种材料的2～10mm厚的平板，焊接接头要求为平焊位置的对接接头。它能实现高速焊接和并具有足够的熔深，实现单面焊双面成形。尽管影响该焊接过程的因素很多，而且这些因素之间的相互关系也很复杂，但电弧的功率对于宏观判断性能的好坏提供了有用的证据。穿孔型等离子弧焊最大的缺点是容易产生咬边，但是可以通过优化焊接参数以及采用脉冲型等离子弧焊的方式进行控制。事实上所有的电弧中都存在等离子体，并且如第六章中讨论的那样，可以通过强烈的热压缩条件得到增强，因此当钨极氩弧焊具有足够高的电流时，它也可能具有穿孔焊的特征。

8.3 激光焊

激光是一种波长固定、能量高度集中的光，可以被用做焊接热源。激光的英文名词是Laser，它是由Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation（受激辐射发射光放大）的首字母组成的。能通过受激发射作用产生激光的物质叫做激光工作物质，它可以是气体、液体或者固体。

气体激光器中常用的工作物质是氦氖混合气体和二氧化碳，而固体激光器中常用的工作物质是红宝石和掺钕钇铝石榴石（简写为Nd：YAG）。目前在焊接中应用最广的激光器是CO_2气体激光器和Nd：YAG固体激光器。最新研究的高功率半导体激光器和光纤激光器在焊接领域也有广阔的应用前景。

8.3.1 CO_2激光器

图8.7显示了CO_2激光器的工作原理，用一个放电过程致使激光工作气体产生受激辐射，初级辐射产生的光子数较少，这些光子在谐振腔两端的反射镜之间来回反射，光束在谐振腔内部的反射使得能量水平增加（被放大），当激光达到一定的能量级别之后，一部分激光透过谐振腔一侧的选择性反射透镜发射出

去。对于 CO_2 激光而言，其自激发产生的光束波长为 10.6μm（在红外线的光谱范围内），并通过一系列反射镜和透镜作用投射到工件上。因为玻璃透镜不能适应该波长的激光，所以 CO_2 激光器中所用的透镜材料是 ZnSe，反射镜则是由铜制成，表面镀上一层金作为反射面。当激光的应用需要长距离传输或较高的系统柔度时，具有低发散性的光束就非常重要了。即使有这样的苛刻要求，激光仍被集成到机器人焊接和切割平台中，以实现各种位置下的焊接和切割。

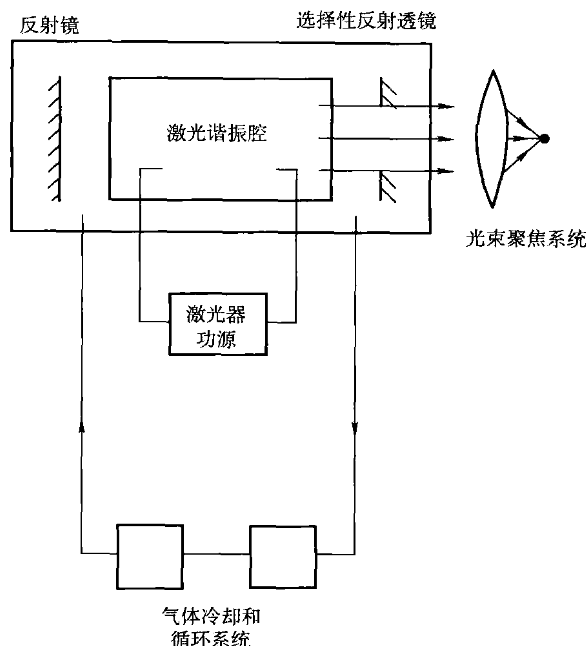


图 8.7 CO_2 激光器的工作原理

CO_2 气体是 CO_2 激光器中产生受激辐射的工作物质，而对于用在工业中的 CO_2 激光，工作气体中可能混合了高达 80% 的氦气和 15% 的氮气。气体受激辐射过程中，谐振腔内会产生热量，为了避免工作气体过热或变得不稳定，气体不断地在冷却系统中循环。

CO_2 激光器可以输出功率在 0.1 ~ 45kW 之间，既可以是连续激光也可以是脉冲激光。激光转换的效率一般在 10% 以下。由于激光产生过程中发热量大，需要大型的冷却器去除系统多余的热量。

8.3.2 Nd：YAG 激光器

图 8.8 是 Nd：YAG 激光器的工作原理图，该激光器中的工作物质由掺杂了钕原子的固态钇铝石榴石制成，利用脉冲弧光泵浦钕原子可以获得脉冲激光，而

利用连续弧光泵浦则可以产生连续激光。Nd：YAG激光器中YAG棒的两端有两块完全平行的反射镜，其中一块是全反射镜，另外一块是部分反射镜，激发产生的激光在谐振腔中振荡放大，当激光能量达到一定程度以后，有一部分激光透过部分反射镜发射出去。Nd：YAG激光器产生的激光在近红外的范围内，波长为1064nm。由于Nd：YAG激光器产生的激光可以穿透普通玻璃，因此激光器中的光学器件都可以用普通玻璃制造，这样可以大大降低激光器的制造成本。同时，利用光纤电缆传送激光可以使激光的应用更加灵活有效。

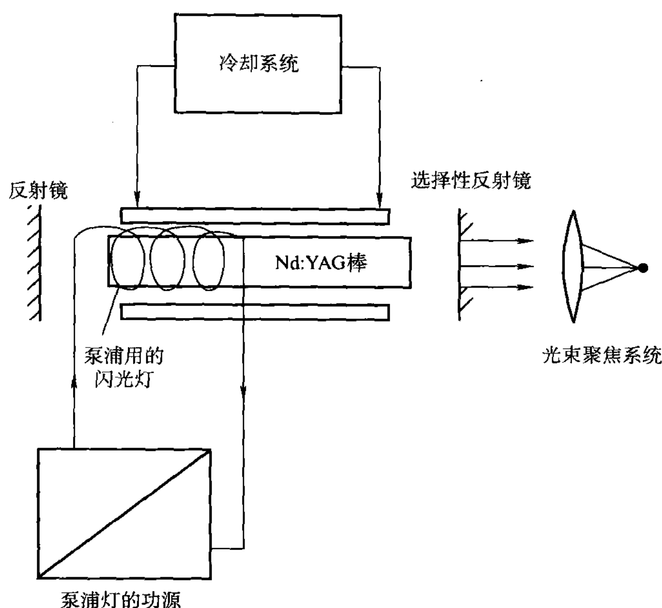


图8.8　Nd：YAG激光器的工作原理

与光学系统相比，利用光纤系统传导激光有很多优点：不再需要制作和装配精度要求极高的玻璃器件；不再需要庞大的外围保护系统；可以使激光和工件之间的距离容易调节。这些优点可以使Nd：YAG激光更方便地应用到自动焊接设备中去。另外，Nd：YAG激光器产生的激光更容易被大多数金属吸收，从而使焊接效率提高。

激光的产生会导致YAG棒发热，因此在利用高功率的Nd：YAG激光进行焊接的过程中，需要采用各种形式的水冷来保证YAG棒正常工作。Nd：YAG激光器的激光转换效率不超过4%左右。由于发热原因，整个系统同样需要大型的水冷机组进行冷却。

Nd：YAG激光束的功率范围一般较二氧化碳激光的功率低，在焊接时通常使用平均功率为0.1～1kW的Nd：YAG激光器。然而，YAG激光可以以脉冲的

形式发射出去，从而获得非常高的激光功率峰值，最高可达100kW。

8.3.3 激光束的特征

CO_2激光器可以产生优良的光束质量，光斑尺寸为0.1mm，且光束横截面上能量呈高斯分布，而更高功率的CO_2激光器（超过1.5kW）可以产生多模激光，其光束不再聚焦于如前所述的小光斑范围。利用光纤传导Nd：YAG激光时，激光因为在光纤内部发生全反射而具有集中的分布模式，这使得光束直径范围内能量均匀分布，光斑直径可以达到0.2～1mm的尺度。激光相关的文献通常采用横电磁波模（Transverse electromagnetic mode，简称TEM）的数目来描述激光的模态，如图8.9所示的高斯分布激光的模态为TEM_{00}。由于高斯分布的边缘确定比较困难，因此在测量激光光束时，通常把光束中心到能量密度下降为中心能量密度的$1/e^2$（0.135）的位置的距离作为光束半径，这个范围内包含的能量是激光总能量的86.5%。当需要提高激光的功率时，可以采用多模分布形式，如双峰状分布或复合分布等。但是采用多模激光会使激光的一致性下降。实际情况中，如果多模激光的能量分布是轴对称状态的，那么同样可以利用它进行焊接加工。

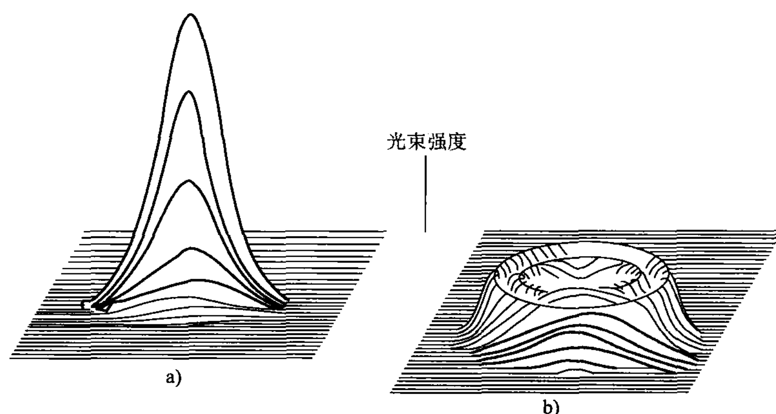


图8.9 激光的强度分布
a）TEM_{00}模式 b）低阶模式

8.3.4 激光焊接

1. 焊接模式

利用激光进行焊接既可以实现热导焊（材料热传导控制），其模式与常规的钨极氩弧焊相似，也可以实现前文介绍的小孔焊模式。在激光焊接中，入射到工

件表面的激光一部分被材料吸收，另外一部分被表面反射。大部分材料对激光的吸收率很低，一般只有10%左右，而90%以上的激光都因表面反射而消耗（奥氏体不锈钢对波长为1060nm的红外光的反射率为92%，而铜的反射率是98%），材料对激光的反射率随材料表面温度的升高而降低，从而更多的能量被材料吸收。材料吸收激光后会产生热量，并从表面向材料内部传导。当激光产生的热量足够多时，材料表面熔化形成熔池，并且熔池中液态金属的对流会促进能量的交换。激光热导焊模式一般被用在微连接中，通过使用低功率的脉冲激光确保低的热输入量。

如果在激光焊接中，熔池中能产生足够的金属蒸汽压力，那么材料对激光的反射率会大大降低，更多的能量被材料吸收，就形成了熔池中的“小孔”。这种模式下，通常利用单脉冲激光进行点焊，或者利用连续激光、连续脉冲激光进行对接缝焊，如前文所述。

激光热导焊产生的焊缝深宽比约为1:1，但小孔型激光焊形成的焊缝深宽比可达到10:1。

2. 激光焊接中的保护气

激光焊接中一般要使用保护气体来防止焊接区域高温的液态或凝固金属发生氧化，由于激光焊接焊速较大，所以一般采用延长的气体保护装置紧随焊接热源后方，如图8.10所示，此外还需要提供背面的保护气以保护接头背面并保证接头成形。激光焊接中常用的保护气是惰性气体氦气和氩气。两种气体各有优点：氦气的电离势较高，作为保护气体时不易被电离形成等离子体；氩气密度大，可以对焊接区域产生更有效地保护，但是它的电离势较低，因此在激光焊接，特别是CO_2激光焊接中必须采取措施抑制氩气的电离。不同的保护气体对激光焊接的焊速和熔深的影响如图8.11所示。

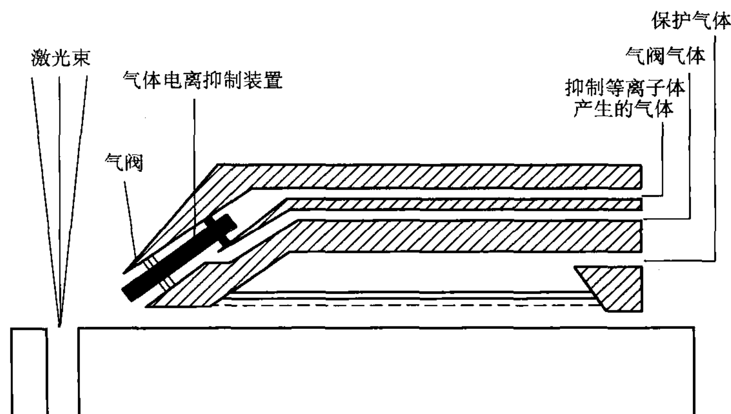


图8.10　激光焊的气体保护装置（包含抑制气体电离的装置）

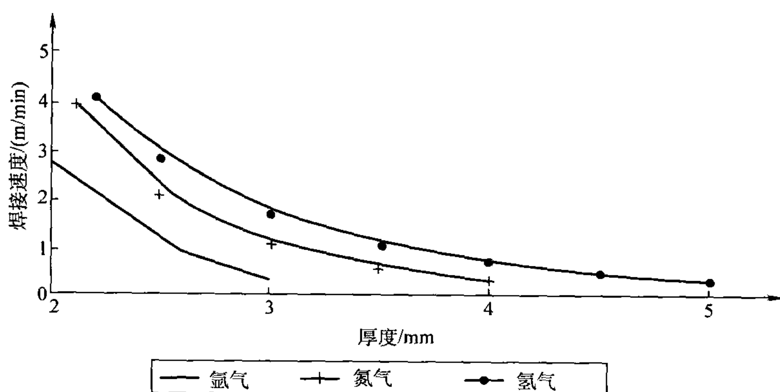


图 8.11 不同保护气条件下用 2kW CO_2 激光穿孔型焊接时工件厚度和焊速的关系曲线

3. 等离子体云的形成

在激光焊接中，激光、金属蒸汽和保护气体之间的相互作用会导致在板材表面产生等离子体，并会阻碍焊接过程的顺利进行。在激光作用下，焊接区域上方的金属蒸汽和保护气体中的自由电子因受到"逆韧致辐射"效应的作用而加速，不断加速使得自由电子获得足够的动能，脱离原子核的束缚，导致金属蒸汽和保护气体原子的电离，从而在焊接区域的上方形成了等离子体云。

文献［160］的研究成果显示：当激光的能量密度低于某一阈值时，焊接过程中不会产生等离子体，并且这个阈值的大小和激光的功率、脉冲宽度、波长等参数有关。对于 CO_2 激光，这个阈值的取值范围在 $1\times10^6\sim3\times10^6 Wcm^{-2}$ 之间，而对于 Nd：YAG 激光，这个能量密度的典型值约为 $10^6 Wcm^{-2}$。在焊接"小孔"开始形成的阶段，等离子体的增加可以提高焊接区域的能量密度，所以它的存在有利于"小孔"的形成。首先等离子体能促进材料对激光能量的吸收，它能够吸收激光并放出波长更短的光，这种光更容易被材料吸收；其次，形成等离子体所产生的反冲力能够促进小孔的形成。当激光功率增加，达到并超过形成等离子体所需的阈值的过程中，可以非常显著地观察到激光与等离子体耦合作用的改进。但是，一旦小孔形成，焊接区域金属蒸汽和等离子体云的存在就会阻碍激光能量传送到工件上。

等离子体云阻碍焊接过程的问题在远红外范围内的连续 CO_2 激光焊接过程中表现得尤为突出。虽然有实验结果显示在利用 Nd：YAG 激光焊接[161]的过程中也会产生等离子体，但在利用脉冲 Nd：YAG 激光焊接 Ti 和 Al 时，电离水平很低，金属及氧化物颗粒对激光散射作用导致的激光能量损失非常有限，所以在 Nd：YAG 激光焊接过程中一般不需要对等离子体进行控制。

4. 等离子体的控制

在利用 CO_2 激光进行焊接的过程中，由于等离子体云对激光的强烈吸收和散射，工件吸收的能量被严重削弱，由此发展出如下等离子体控制技术。

1）等离子体控制装置。采用一个辅助的吹气装置可以使焊缝区域的等离子体被吹散或是进入小孔[162]。吹气装置在理想情况下应该在激光束前方 1mm 左右、正对着等离子体云，指向工件，并和工件表面的角度约 20°。除此之外，还需要一个与之同轴的气体保护装置，防止吹出等离子体的过程中卷入外界空气。整个气体系统的典型布局如图 8.10 所示。氦气因为其电离势高而成为吹气装置中的首选气体，有些情况下也可以用氩气和氮气。

2）高频脉冲。当 CO_2 激光的脉冲频率超过 1kHz 后，在焊接过程中等离子体现象会得到有效控制，同时采用机械振荡和电子振荡的方法，并采用较高的焊接速度，获得了较大的深宽比[163]。

3）光束摆动。当激光沿焊接方向做线性摆动[164]，并且辅助于等离子体控制装置，则在同样功率的激光条件下得到了更大的焊接熔深。辅助的吹气装置可以将产生的等离子体吹走，光束的线性运动改善了光束作用。

5. 激光的输出脉冲

CO_2 激光和 Nd：YAG 激光都可以通过将激光脉冲调节到很高的水平来提高输出功率的峰值。某典型的功率为 5kW 的连续 CO_2 激光安装 0～25kHz 的脉冲频率调节器，可以得到峰值功率为连续激光输出功率 5 倍的脉冲激光。而对于 Nd：YAG 激光，平均功率为 400W 的连续激光可以调节成峰值功率在 5～20kW 范围内的脉冲激光。和连续激光相比，高峰值功率的脉冲激光可以实现更多材料的焊接，并且可以利用重叠脉冲来获得连续焊缝。

6. 焊接过程控制

激光焊接过程的控制参数可以划分为主要控制变量和次要控制变量，见表 8.2。

主要控制变量（激光输入功率、焊接速度）与接头厚度之间的关系对大多数材料和激光种类来说都是一致的，如图 8.12 所示[165]。次要控制变量对焊接过程的影响更为复杂，但已经有些研究试图建立焊接参数范围，这些研究描述了焊接速度和离焦量之间的关系如图 8.13 所示。保护气体的流量对激光焊接的效率有显著影响，特别是在 CO_2 激光焊接中用氩气作为保护气体时，存在特定的保护气体流量，非常容易引起等离子云。保护气体形成的等离子云问题相对严重，因为即使激光吸收降低了工件的耦合作用后，这种等离子云仍存在，金属蒸汽等离子体却会随光束吸收作用的减弱而受到抑制。

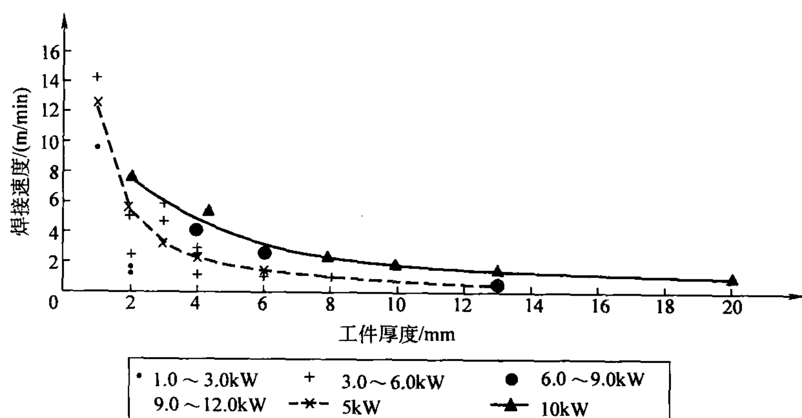


图 8.12　不同功率水平的激光小孔焊条件下
工件厚度和焊接速度的关系曲线

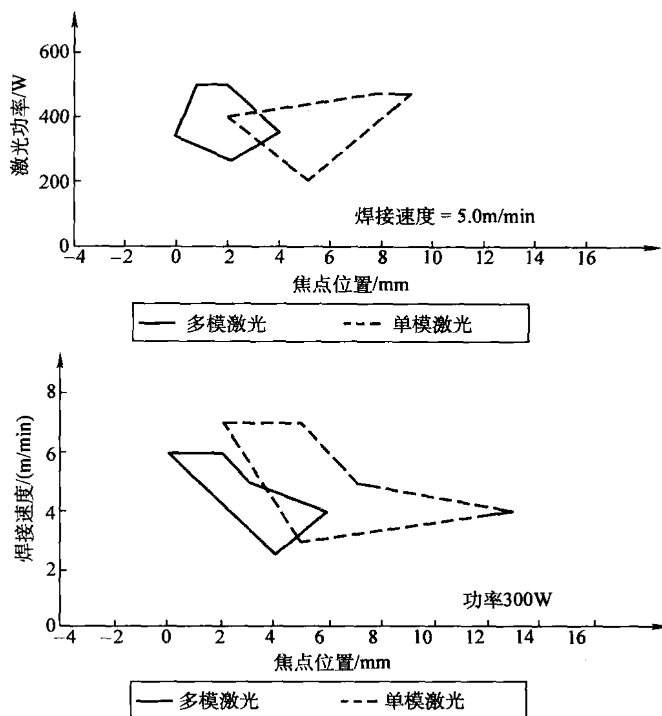


图 8.13　采用 CO_2 激光对接 0.5mm 厚不锈钢板时
次级控制变量对焊接质量的影响

表8.2 激光焊接的控制参数

主要控制变量	次要控制变量
光束能量 焊接速度 光斑尺寸（及位置） 操作模式（连续或脉冲）	脉冲参数 等离子体控制 保护气体 光束模式（通常是固定的） 是否填丝

8.3.5 激光焊接的应用

可以采用激光进行焊接的材料范围，首先是由材料本身的物理性能（如材料对激光的反射率和材料的热扩散系数）决定的，其次取决于材料的冶金特性。对于穿孔型激光焊，一旦小孔现象产生，即使对于高反射率的材料（如镍），也能成功焊接，但是像铜这样的反射率和热扩散率都很高的材料依然很难采用激光焊。

绝大多数激光焊中会出现的冶金问题和其他熔焊中出现的问题相似，比如高碳钢和合金钢的冷裂纹、铝合金中的气孔和凝固裂纹，但如果采用适当的预防措施，这些问题都可以得到一定的限制。激光焊接的一些常见应用领域如下：

1. 奥氏体不锈钢

可以用激光进行焊接的不锈钢板的厚度变化范围很大，激光焊接13.3mm厚奥氏体不锈钢的典型焊接参数已在前图中给出。如果焊接中采用11kW的CO_2激光，则焊接速度可以提高到1m min^{-1}。其他的焊接方法必须采取必要的措施来防止凝固裂纹和热敏感性，而且激光焊的热循环可以降低对热影响区（HAZ）内材料性能的影响。

2. 低碳钢

低碳钢可以用多种焊接方法进行加工，包括熔化极气体保护焊（GMAW）和非熔化极气体保护焊（GTAW）。采用激光等设备成本高的焊接方法加工低碳钢主要目的在于提高生产效率和接头质量。CO_2激光和Nd：YAG激光都能成功焊接表面没有涂覆保护层的碳钢，焊接接头没有特别突出的缺陷。低碳钢激光焊接的成功应用在下述案例中得到证实。

在薄板焊接方面，激光焊主要用来加工高精度的薄壁件，如利用5kW的CO_2激光焊接数控冲床箱体中的梁，焊后直接应用，又能大大降低焊接变形[166]。

激光被广泛应用于汽车工业中的低碳钢焊接，如焊接汽车底板和发动机支撑架等[167]。在大多数情况下，激光都和自动控制的机械手联合组成自动焊接设备，例如将1kW的Nd：YAG激光采用光纤传导也已经应用于焊接机器人。

具有表面涂覆层的钢板，特别是镀锌板，很难实现激光焊接，即便是通过实验得到了比较合适的焊接参数，但这些参数的通用性不强，不一定满足不同批次的板材。根据文献报道，有一些实验利用多模分布的 Nd：YAG 激光成功焊接了镀锌钢板[144,168]。

激光也可以用来焊接高强钢的厚板，如 ASTM A36（w(C)0.29%，w(Mn)0.8%～1.2%，w(Si)0.15%～0.40%）[169]。实验发现利用功率为 15kW 的 CO_2 激光焊接 19mm 厚的钢板时，最高焊速可以达到 1m min^{-1}。从生产成本的分析来看，利用激光焊接高强钢的厚板收回设备成本大概需要三年时间。

3. 钛合金

钛合金的连接也能采用激光焊，但是在焊接过程中必须防止空气对焊缝金属的污染及由此引起的钛合金脆化。文献［170］曾经利用 4.6kW 的 CO_2 激光焊接 3mm 厚的钛合金板，焊速高达 6m min^{-1}。

4. 镍基合金

一系列镍基合金都已经用激光进行了焊接。有文献报道用功率为 11kW 的 CO_2 连续激光以 0.5m min^{-1} 的焊速可以成功焊接 Inconel 600 合金（名义成分 w(Ni)75%，w(Cr)15%，w(Fe)8%）。另外 C263 和 Jethete M152 合金也都可以用激光焊接。

8.3.6　实际操作中的注意事项

1. 接头形式和精度

图 8.14 中列举的对接、搭接、点焊、边接和 T 型接头都是常见的焊接接头形式。由于激光的聚焦斑点很小，所以接头装配的要求非常严格，接头准备的要求也非常高。除此之外对于焊接过程中的激光器、焊接工位、定位装置等任何设备的精度要求也很高。

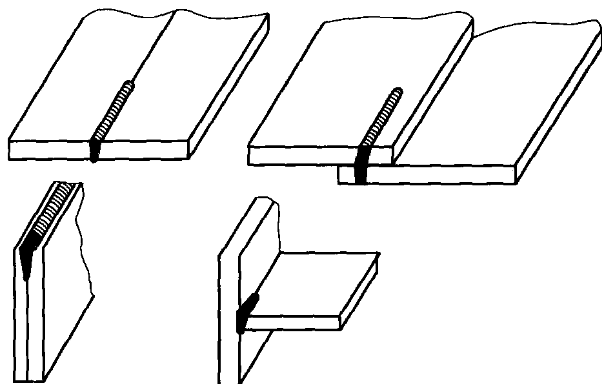


图 8.14　典型的激光焊接头形式

2. 安全保护

激光本身以及被工件或是周围卡具反射回来的激光都是极其危险的，特别是高功率激光，因此在激光的操作过程中必须采取足够的保护措施。另外，在激光定位和激光焊接过程中，工作人员都需要戴上防护眼罩。激光焊的其他危险和其他焊接方法一样，包括如烟尘、触电等危险。

8.3.7 激光焊的发展

1. 激光增强的电弧焊和电弧增强的激光焊

已有一些学者[171,172]开展了电弧增强的激光焊接方法的研究，利用钨极产生的电弧在前方预热并熔化被焊板材，激光用于增加熔深和/或焊接速度。研究结果表明，利用一个300A的钨极氩弧焊的电弧去增强1kW的激光进行焊接，产生的焊接效果和单独使用2kW的激光相当。由此可见利用电弧对激光的增强作用可以使功率较低的激光有更广泛的应用。同时激光可以解决大电流和高速度钨极氩弧焊时出现的焊瘤问题。虽然还没有和第6章中提到的多极钨极氩弧焊方法进行比较，但是利用低成本的电弧增强激光的焊接方法应该可以达到相同的焊接效果。

2. 激光复合焊

目前，激光和熔化极气体保护焊（GMAW）的复合焊接方法正在被广泛地研究，并已经开始应用于各不同工业领域，如汽车制造业和造船工业。这种方法被称为激光电弧复合焊，和单纯熔化极气体保护焊相比，可以得到更高的焊接速度和更大的焊接熔深；和激光焊相比，装配工艺裕度更大。激光的加入使电弧的引弧过程更容易，也增加了弧根的稳定性。随着技术的进步，目前的激光复合焊接设备已经不再采用独立的激光头和GMAW电弧头的组合，而是开发了专业化的激光复合焊枪。

3. 多束激光的应用

针对Nd：YAG激光，目前已经开发出了利用光纤分导系统导出三束400W激光并分别导入普通输出设备的新型焊接设备[168]，通过调节这三束激光之间的脉冲相位关系，可以得到最大的输出功率，或通过相移获得更高的焊接速度和更好的焊接控制。

4. 激光的发展

随着技术的进步，一些不同于传统的激光器陆续被开发出来，并且激光使用效率和应用效率都得到了提高。这些新发展中最引人瞩目的内容包括：准分子激光器、射频（RF）和微波激发的CO_2激光器、二极管泵浦激光器、一氧化碳（CO）激光器、高功率二极管激光器和光纤激光器。

1）准分子激光器。准分子激光器中的激光激发物质是稀有气体，常用氙

气、氪气或氩气，一般都需要混合氟气、氯气或溴气等卤素气体。准分子激光器输出的激光波长在 193 ~ 350nm 之间，属于紫外线范围。准分子激光的平均功率普遍不高，但是峰值功率却可以达到 100kW 的水平。准分子激光可以通过光蚀技术使材料中的分子键在没有太多热量的条件下就发生分解，因此它通常被用于电子、半导体、医疗设备等工业中的精密钻孔、切割、打标和清洗。

2）射频（RF）和微波激发的 CO_2 激光器。虽然直流触发的 CO_2 激光器可以产生功率高、光束质量好的激光，但是用高频激励方式可以进一步提高光束质量。目前射频激发的 CO_2 激光已经开始用于焊接加工，而微波激发的 CO_2 激光还处在研究阶段，但预计它可以提供更高质量的光束、更高的激光转化效率，同时综合成本较低。

3）二极管泵浦激光器。由于氙灯辐射的波长范围很宽，而能够用来泵浦激光的波长范围却很窄，所以一般情况下用氙灯来泵浦固体激光器时激光的产生效率很低。采用二极管泵浦激光可以获得更高的效率。二极管泵浦激光的典型代表为 GaAlAs 二极管，其辐射波长的范围在 750 ~ 900nm 之间，但高功率二极管泵浦激光的发展受到限制。目前功率在 1W 左右的二极管泵浦激光已经商业化，但功率较低限制了二极管激光器的应用领域，一般常用于微连接等领域。

4）一氧化碳（CO）激光器。日本已经开展了 CO 气体激光器的研制[174]。CO 激光器能产生波长为 5μm 的激光，这个波长位于 CO_2 激光和 Nd：YAG 激光的波长之间，这可能使其应用于光纤传播时具有更大的潜力。因此如果能将它用光纤进行传导，将具有很大的应用前景。目前已经有利用 CO 激光进行切割的示范应用，但利用它进行焊接的研究仍在进行中。

5）高功率二极管激光器。最近高功率直接调制二极管激光器已经研制成功，并开始用于焊接和表面强化。该激光器可以提供功率高达 4kW 的激光，对应的波长在 800 ~ 900nm 之间。矩形波二极管脉冲激光适合于进行表面强化和改性等操作，但如果使用光纤等传导设备，则该激光也可以用于焊接操作。与 CO_2 激光器和 Nd：YAG 激光器相比，高功率二极管激光器最大的优点在于它具有较高的激光转化效率（典型转化效率为 25%），另外它的设备也更紧凑。用光纤传导的高功率二极管激光能够更方便地与 GMAW 相复合，从而能更好地体现出激光复合焊接的优点[175]。

6）光纤激光器。光纤激光器中的工作物质是掺杂了 SiO_2 的玻璃纤维，它需要用半导体激光进行泵浦。激光工作物质中一般还掺杂 Er 元素或 Yb 元素，有时候两者都有。光纤激光的激光直接在光纤中产生，可以避免利用光纤传导二极管激光时出现的一些复杂的耦合问题。目前单个光纤激光器输出的激光功率不超

过 1kW，但是如果用一根 10～200m 长的光纤将多个低功率的光纤激光器串联起来就可以得到更高的功率输出。利用这种方法可以制作输出功率达到 20kW 的商业化光纤激光器。光纤激光器具有激光转化效率高、设备紧凑、输出稳定并且光束质量好等优点。它的激光转化效率可以达到 25% 以上，可以实现移动状态下的焊接，如焊接管道的环焊缝[174]。和高功率二极管激光一样，光纤激光也可以和电弧复合形成复合激光焊接。

8.3.8 小结

激光可以实现薄板材料的高速焊接，另外可以用深熔焊的方式来焊接厚度达 12mm 的接头（如果接头厚度达到 25mm 则需要用高功率激光）。很多材料都可以利用激光进行焊接，既可以用 CO_2 激光也可以用 Nd：YAG 激光。

低功率的激光一般用在仪器仪表制造和电子制造业中，而高功率激光的开发仍在深入进行中，主要应用于汽车、造船和航天工业上。

激光设备的初始投入虽然很大，但在很多应用领域，它可以带来更大的投资回报。

8.4 电子束焊

早在二十世纪六十年代，电子束就开始作为一种热源应用于焊接技术，电子束焊（EBW）也作为一种高质量的精密焊接技术得到应用。

8.4.1 电子束焊的基本原理

在电子束焊接设备中，当小电流（如 50～200mA）通过钨丝时会产生电子，钨丝附着在高压系统（30～150kV）的阴极上，而电流通过时产生的电子被电场加速从阴极飞向阳极，如图 8.15 所示。在电场和磁场的作用下，散射出的电子束在传导过程中最终实现聚焦，当然也可以在电、磁场作用下偏转或散射。在电子束焊设备中电子枪可以安装在真空室内，也可以放置在真空室外部，但被焊工件必须放在真空室内进行保护。

8.4.2 电子束的基本特征

电子束聚焦以后，焦点处的功率密度高达 10^{10} 到 10^{13} Wm^{-2}，因此利用电子束进行焊接时一般采用穿孔型焊接。导致电子束焊接中“小孔”形成的力包括电子束冲击力、金属蒸汽压力、金属蒸发产生的反冲力。虽然熔池的表面张力和液态金属的重力会阻碍焊接“小孔”的形成，但是一般情况下促进“小孔”形成的力要更大一些。例如：电子束的冲击力的可以表示如下式[177]：

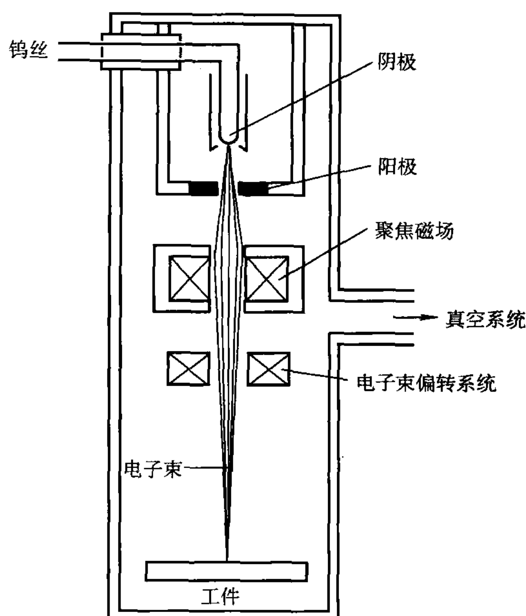


图 8.15 电子束焊接的工作原理

$$P_a = 2Jm_eV/e^2 \tag{8.1}$$

其中，J 是电流密度，V 是加速电压，m_e 是电子质量。对于斑点半径为 0.3mm 的电子束，钨丝中流过的电流为 100mA，加速电压为 100kV，则产生的电子束的冲击力约为 $300\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$。金属的蒸汽压力和温度相关，在电子束焊接中可以达到 $5\times10^4\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$的水平。金属蒸汽产生的反冲力在功率密度为 $3.5\times10^{10}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$时约为 $10^7\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$。虽然不能和促进“小孔”形成的力相平衡，液态金属的表面张力在“小孔”直径为 0.5mm 的情况下也能达到 $7\times10^3\text{N m}^{-2}$。

尽管激光焊、穿孔型等离子弧焊具有和电子束焊类似的焊接速度/熔深曲线（见图 8.16），但电子束焊接可以实现更大熔深的穿孔型焊接。

8.4.3 电子束焊的控制

表 8.3 详细列举了电子束焊过程中的主要控制变量和次要控制变量。在电子束焊中比较特别的是，即使是建立了良好的电子束功率与焊接速度、板厚之间的关系，次要控制变量的改变依然能够对焊接性能产生显著影响，特别是电子束的偏转和聚焦情况对焊缝的深宽比有重大影响。有时候为了改善焊缝的外观，在深熔焊之后，刻意将电子束进行一定程度的散焦后再沿原来的焊缝焊接一次。

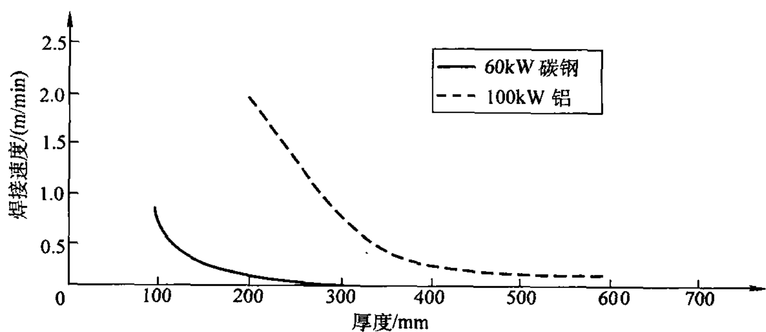


图 8.16 用电子束焊不同材料时工件厚度和焊接速度的关系曲线

表 8.3 电子束焊中的主要控制变量和次要控制变量

主要控制变量	次要控制变量
钨丝电流 电压 焊接速度	聚焦斑点 束流偏转 电源 真空

8.4.4 电子束焊的应用

绝大部分金属材料都可以利用电子束进行焊接，如合金钢、镍合金、钛合金、铜合金以及异种金属之间的焊接，接头的厚度可达 0.025 ~ 300mm。下文将介绍一些典型的电子束焊的实例。

1. 航空航天领域

在航空航天领域，电子束焊被广泛应用于飞机发动机部件的制造，例如罗尔斯-罗依斯公司的一台 RB211 发动机上就有接近 100m 的焊缝是用电子束焊完成的[178]。其中主要应用包括大横截面的钛合金定子的连接、压缩机定子和转子支架的制造等。电子束焊接的应用受到工业需求的促进，这些需求主要体现在焊缝完整性要求高，包括小焊接变形、热循环对材料性能的影响低等方面。

2. 电子、仪器和医学等领域

电子和医学仪器中许多传感器和电子元器件的封装都采用电子束焊接。这一领域电子束焊接所涉及的材料包括封装所用的奥氏体不锈钢，以及用于人工关节制造的钴铬合金等。

3. 汽车工业

电子束焊由于具有深而窄的焊缝已经被应用于焊接齿轮上的周向焊缝以制造

齿轮簇，同时这一方法还用于制造汽车传动部件，如齿轮轴等。可操作性好、焊接质量高是电子束焊应用于相关产品制造中的主要考虑因素。当然，能够完成焊后直接使用，不需要焊后热处理，焊后无变形，也是需要重点考虑的因素。

4. 异种金属的焊接

电子束焊在异种金属焊接方面的应用主要是对接接头连接高速钢叶片和碳钢加强肋，以制造刀具。虽然激光焊和等离子弧焊也在相关领域得到应用，但电子束焊的焊速可以高达 10m min^{-1}，大大提高了生产效率。

5. 铜合金

和激光焊不同，电子束焊可以应用于很多种类的铜合金的焊接。文献[179]曾经采用功率为 10kW 的电子束，以 0.7m min^{-1}的速度，焊接厚度超过 12mm 的铜合金接头。

8.4.5 实际操作中的注意事项

1. 真空的使用

电子束焊接通常在真空室内进行的。真空环境可以防止电子和气体原子发生碰撞而衰减电子束能量，也可以防止电子枪和焊接区域被空气污染。电子束焊的主要优点在于其能够提供清洁、惰性的环境，这有益于实现稳定的高质量焊缝。但其缺点也在于真空的应用，每次焊接前都需要花费大量的时间抽真空。真空度要求越高则实现越困难。为了降低整个真空室内的真空度，很多电子束焊设备对电子枪区域和焊接区域采用了不同的真空标准，如电子枪附近的真空度要求为 5×10^{-4}mbar（$1bar=10^5Pa$），而焊接区域的真空度则降低到 5×10^{-2}mbar。

由于电子束焊接全过程都是在真空室中完成，因此要求焊接卡具和定位设备都具有较高的清洁度，且具有较低的蒸汽压。

2. 安全保护

电子束和金属表面的碰撞会产生 X 射线，因此电子束焊过程中需要采用保护罩使操作者免受射线的伤害。

3. 接头形式

电子束焊中常用的接头形式通常是不同的对接接头、搭接接头和 T 型接头，如前文中图 8.14 所示。由于电子束的斑点半径也很小，所以焊接中同样需要较高的定位精度和复杂的焊前准备。

8.4.6 电子束焊接的发展

虽然电子束焊接技术的基本原理一直都没有改变，但是随着技术的发展，在提高电子束功率、改进焊接操作技术和改进焊接设备方面都取得了很多进步。

1. 电子束焊接的束流功率

对于绝大多数的焊接情况来说，25kW 的电子束功率已经足够了，但是为了使电子束焊接具有更大的熔深，特别是使它在使用过程中可以脱离真空环境，功率超过 200kW 的电子束已经研制成功。

2. 抽真空装置

抽真空的时间可以大幅度降低，特别是当利用大的真空室焊接小零件时，通过在真空室内设计小的密封室和分级减压系统可以实现这一要求。图 8.17 中是 Wentgate Dynaweld 的专利设计“穿梭转移式真空系统”，系统中设计了一个可以预先抽真空的小焊接室来承载小焊件，通过轨道传送进入焊接真空腔的小焊接室配备有“O”形环，可以对小焊接室起到密封作用。

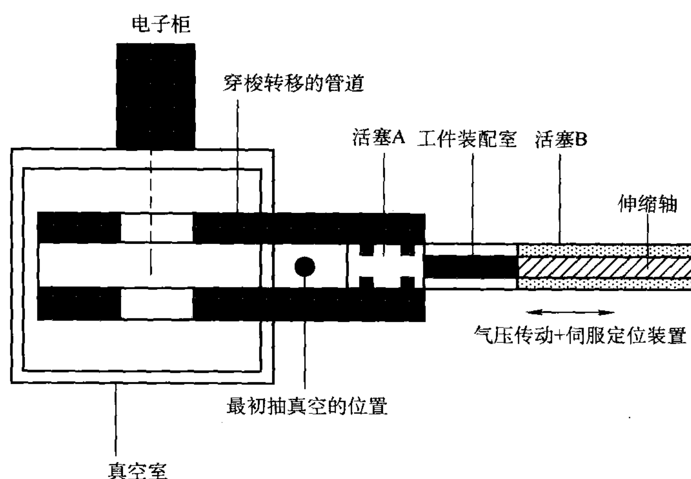


图 8.17　适用于小工件的穿梭转移式真空系统
（Wentgate Dynaweld 的专利设计）

3. 金属蒸汽的防护和束流捕获

电子束焊过程中，如果电子枪吸附了金属蒸汽，则焊接过程会变得不稳定。通常在焊接系统中设计一个机械保护罩来隔离金属蒸汽和电子枪。在这方面的更进一步的进展是由英国焊接研究所（TWI）研制的磁场捕获的办法。设计原理图如图 8.18。利用这种方法可以在铝合金焊接时有效地防止电子枪与金属蒸汽间的放电[180]。

4. 计算机控制

现在的电子束焊设备中大多都集成了数控技术和计算机控制技术，焊接过程中利用计算机控制工件的定位、操作周期和焊接参数。这些设备简化了焊接参数的选择，可以和集成化制造单元相结合，如果加入远程通信数据链，还能实现远

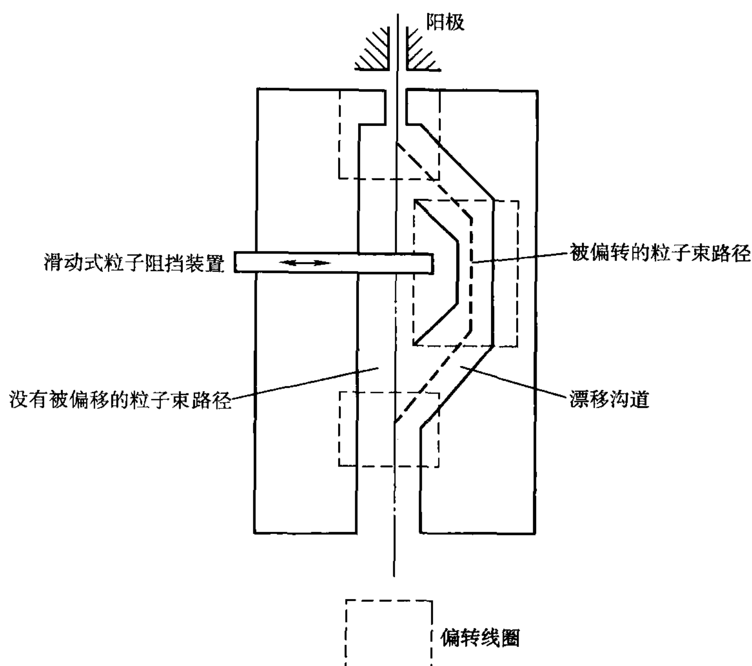


图 8.18 英国焊接研究所研制的三弯曲（偏转）磁捕获装置

程的操作和诊断。

5. 非真空电子束焊接

随电子束功率的提高，在非真空状态下进行电子束焊操作变得可能。目前用于焊接 6mm 厚铝板的非真空电子束焊设备以及能和机械手相结合的非真空电子束焊设备都在研发过程中。

8.4.7 电子束焊的电源

第 3 章中介绍的固态电源也可以用于电子束焊接设备以提高设备的控制功能和一致性，能提供更高电能转换率的逆变设计特别适用于上述应用。

8.4.8 小结

电子束焊长期被用来焊接高质量、大熔深和小变形的接头，通过改进焊接设备，应该可以显著提高焊接生产率。

和普通电弧焊相比，虽然电子束焊的设备投资要高得多，但是该方法综合性价比的评价必须同时考虑其潜在高性能焊接接头和较高的生产效率。

8.5　本章小结

本章详细介绍了穿孔型等离子弧焊、电子束焊和激光焊三种高能密度的焊接方法，其中穿孔型等离子弧焊得到了较好的发展但应用较少；电子束焊在一些特定的领域得到了深入的研究和应用；激光焊的应用领域正在不断拓宽。激光和电弧复合焊接方法综合了激光焊和电弧焊的优点，包括提高了的焊接速度、装配精度的要求降低等。三种高能束焊接方法的特点在表8.4中进行了详细的对比。

表8.4　高能束焊接方法的对比

特　征	等离子穿孔焊	激　光　焊	电子束焊
能量密度/（W/m^2）	3×10^{10}	3×10^{11}	10^{11}
厚度范围/mm	<12	<20	<200
焊接速度	比钨极惰性气体保护焊高	高	非常高
可焊材料	所有材料，但铝合金需要直流反接或交流焊接	大部分材料，但对于反射性表面难度较大，如铜、银等	大部分材料，但对于蒸汽压低的材料无法焊接，如镉、锌、带涂层的材料等
系统要求	简单，与钨极惰性气体保护焊相似	高度自动化的，需要防护屏	通常在真空环境下，需要X-射线防护屏，高度自动化
设备投资	比钨极惰性气体保护焊略高	10~50倍的钨极惰性气体保护焊成本	10~50倍的钨极惰性气体保护焊成本
运行成本	低	高	非常高
焊缝成本	取决于应用		

第 9 章　窄间隙焊技术

9.1　引言

利用加强焊接过程控制和提高焊接速度等方法，可以减少接头焊后检测和修复工作量，或降低接头完成所需的时间，从而大大提高焊接加工的经济效益。焊接方法中很多技术进步的目标是通过采用自动化焊接设备，提高熔敷速度等方法减少完成接头所需的时间，进而减少生产中的人力耗费。

另一个可行的减少焊接接头完成时间的方法是减小焊缝尺寸或其体积，对于角焊缝来说，减小焊缝尺寸的可能性取决于焊接设计的限制，同时焊接参数的选择对减小焊缝尺寸的效果起控制作用。而对于对接焊，焊接熔合区的体积可能需要通过改变焊接接头形式和焊接方法来实现。

窄间隙焊是专门为减小对接焊焊缝熔合区体积而设计的一类焊接方法的总称，这些方法主要用于碳钢和低合金钢板材的对接焊，具体的应用下文将做详细介绍。

9.2　窄间隙焊的原理和特征

对于常规的“V”形坡口焊接，接头熔合区的体积和焊接时间都与接头厚度的平方成正比，如图 9.1 所示。当“V”形坡口的角度变小时，熔合区的体积和焊接时间都会明显减小，如果坡口变成两侧边平行的窄缝，这一差别将非常显著，并且这种差别在厚板焊接过程中表现得更加明显。这种平行的窄缝，或装配紧密的对接接头，对焊接方法的要求较高，只适用于闪光焊、摩擦焊、磁控旋弧焊、穿透型等离子弧焊、激光焊和电子束焊等方法。如果想在普通电弧焊中使用窄间隙焊技术，必须使用专门的技术。

窄间隙焊除了具有潜在的经济性的优势，还可以获得较小的焊接变形和更加均匀的接头性能。一些研究者指出[181]：窄间隙焊接头的力学性能比传统的“V”形坡口接头好，这可能与后续焊接对前道焊缝的晶粒细化作用和较低的焊接热输入有关。厚板焊接时可能产生的现实问题是焊后的检测和修复都比较困难，这就要求保证焊接过程的一致性并采取足够的在线监控。

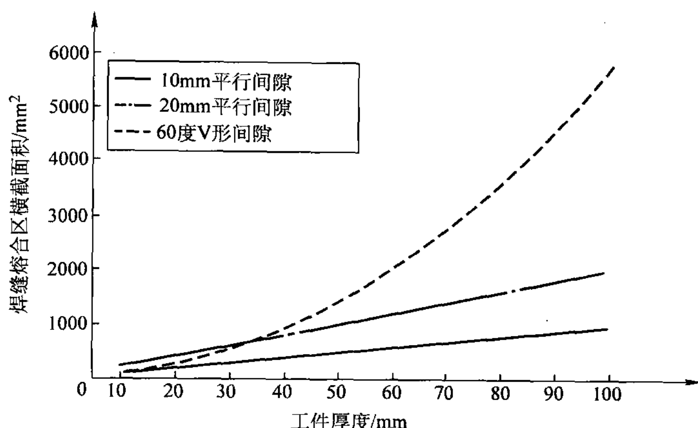


图 9.1 窄间隙焊的基本现象——接头准备对坡口横截面积的影响

9.3 窄间隙焊接方法

窄间隙焊技术具有一些共有的特征:

特殊的接头形式。

专用的焊接设备（主要是焊枪）。

需要进行弧长反馈控制和焊缝跟踪。

可能需要特殊的焊接材料。

窄间隙焊中最简单的坡口形式是两边平行的窄缝，背面加上衬底，但是根据不同的焊接条件和实际应用，坡口可以在简单坡口的基础上设计各种不同的形式。图 9.2 中列出了一些具有代表性的窄间隙焊的接头形式。随焊接方法和焊接设备的不同，间隙的宽度也不相同，钨极气体保护焊（GTAW）所对应的间隙宽度约为 8mm，而埋弧焊（SAW）的间隙宽度可达 20mm。对于很多焊接方法，窄间隙焊可以采用标准的自动化焊接设备，但是如果板厚太大（如 100mm 以上，判断是常规焊接方法还是窄间隙焊方法时的接头厚度判据并不是固定的，而是依赖于应用条件及焊接方法的经济性），则必须使用专门设计的焊枪以保证具有足够的施焊空间，同时还需要足够的气体或焊渣为焊缝区提供保护。这时可以仍然采用常规焊接电源和送丝系统，但必须保证输出的稳定性和可重复性。焊接过程中焊枪的高度和它离间隙边缘的距离必须始终和初始设定值保持一致，因此焊接过程中需要使用某种形式的焊缝跟踪和高度反馈控制等技术。焊接材料可能也需要进行改进，以保证提供良好的焊缝成形。对于药芯焊丝电弧焊和埋弧焊等熔渣保护的焊接方式，要求凝固的熔渣能够很容易清理。

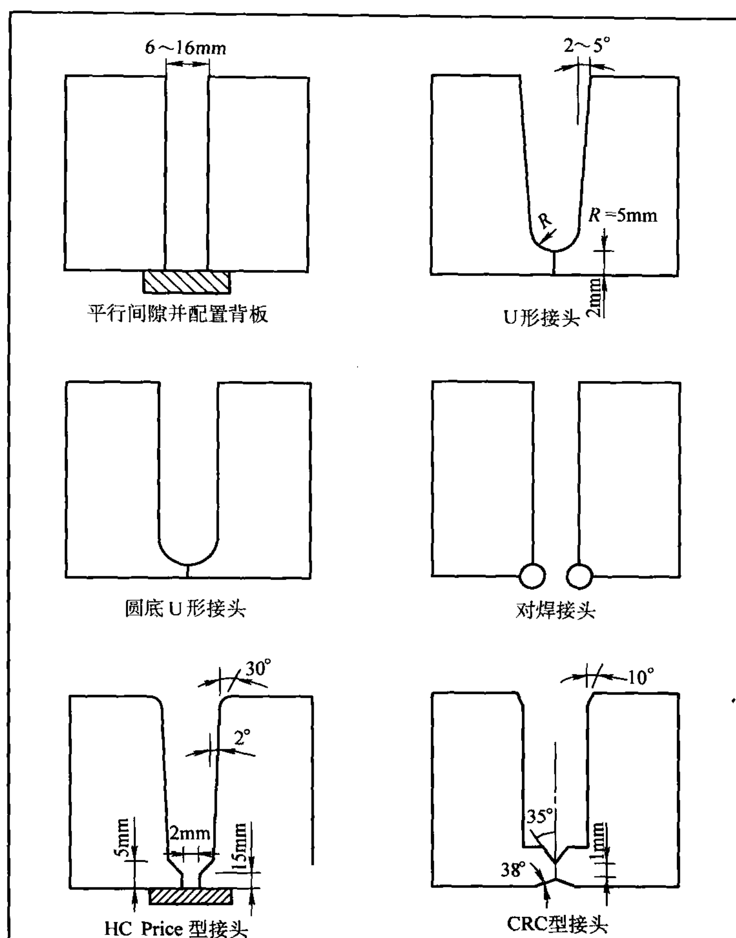


图 9.2 典型的窄间隙焊坡口准备

9.3.1 钨极气体保护焊

1. 冷丝钨极气体保护焊

因为非熔化极气体保护焊的焊枪结构紧凑，所以能比较方便地用它来进行窄间隙焊操作，而且对于相对较薄的结构，只需要调整非熔化极气体保护焊焊枪中的钨极长度，使它从气体保护中伸出的长度增加即可（见图 9.3），同时，还要注意对送丝系统采取一些前期措施以保证焊丝的顺利添加，在板厚不超过 12mm 时这也可以由常规设备完成，但是对于厚板，则需要重新设计焊枪，使它能提供更充分的气体保护，并且具有可靠的焊枪定位系统。图 9.4 是利用钨极气体保护

焊进行窄间隙焊时所设计的加长的专用焊枪，保护气体不仅可以从电极各方向的矩形槽中喷出，还能通过焊枪周围的小孔提供，形成充分的气体保护。

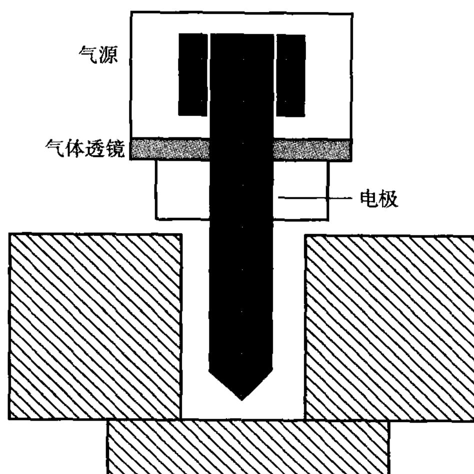


图 9.3 用传统 GTAW 焊枪进行的窄间隙焊
（注意：需要添加辅助的气体保护系统）

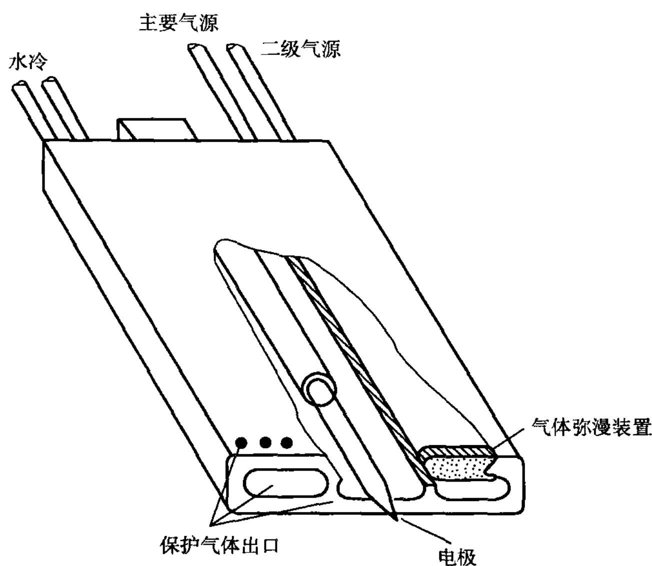


图 9.4 窄间隙 GTAW 焊枪

虽然窄间隙焊设备的设计从原理上简洁易懂，但人们也发现，如果保护气的供气系统采用直筒形式的气罩，很难完全排除焊缝周围的空气，因此供气系统一

般会采用图 9.5 中所示的伸缩式气罩和可调节的气体挡板来提高气体保护能力。

目前利用钨极气体保护窄间隙焊可以焊接厚度达 200mm 的工件，特别适合环形焊缝和管道焊接。

2. 热丝钨极气体保护焊

第 6 章中介绍的热丝钨极气体保护焊非常适合采用窄间隙坡口，因为焊接中焊丝的熔化速度可以达到和熔化极气体保护焊相当的水平。很多钨极气体保护焊设备在进行窄间隙焊时都采用送热丝的方法，最典型的代表是用来焊接陆上输送管道和船用接驳管道的 Roboweld™设备。通过第 10 章中描述的方法，可以成功实现焊缝跟踪和电极的精确定位。当然，也有一些焊接系统中采用了视频监控的方法来监控电弧和焊枪的位置，使操作人员可以跨过自动控制系统直接调整焊炬的位置。可以采用机械摆动电极或是利用磁场使电弧发生偏转增加间隙侧壁处的熔化。

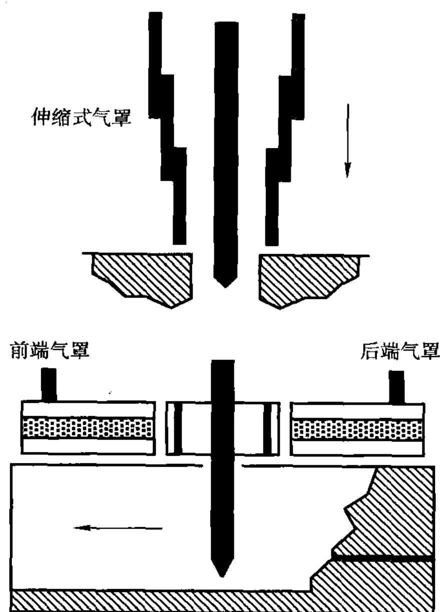


图 9.5 附加的气体保护装置

9.3.2 熔化极气体保护焊

和手工电弧焊相比，熔化极气体保护焊的优点是它可以使用更窄的坡口并作用于小角度的焊接坡口。然而，即使允许一定程度上降低技术要求，这一优点在熔化极气体保护焊的手工操作中也并未得到完全的开发，这可能是由于焊枪可达性降低使得维持稳定的熔化变得困难。自动焊使更好的控制成为可能，可以很好地焊接坡口较窄的焊缝。窄间隙熔化极气体保护焊的发展可以归纳为如下两个方面：

1）利用传统的自动焊设备进行窄间隙焊。

2）设计专门的窄间隙熔化极气体保护焊接设备。

1. 窄间隙小坡口熔化极气体保护焊

第一类熔化极气体保护窄间隙焊主要应用在管道焊接方面，例如，CRC Evan 焊接设备[184]在焊接管道时采用如图 9.2 中的复合坡口形式，所得焊缝熔合区的体积要比采用美国石油研究所（American petroleum Institute，简称 API）的标准坡口小 20% 以上。焊接过程中，管道沿轴线方向被固定在水平位置，焊接必须在五个自由度上进行（包括焊枪围绕管道的旋转），所以焊接中需要使用带有送丝摆动机构的变位机。典型的焊接条件在表 9.1 中有详细介绍。用这种焊接

设备已经成功地焊接了直径在600~1500mm范围内，壁厚在8~22mm范围内的管道。

表9.1　CRC管道焊接工序中的焊接条件

焊接参数	每层焊缝的焊接条件 焊帽 4 3 2 1 有焊丝填充的焊缝 热焊缝 根部 接头的形貌				
	根部焊缝	热焊道	填充焊缝 1~3层	填充焊缝 第4层	焊帽
焊接速度/(mm/min)	760	1000	330	330±10%	330±10%
送丝速度/(m/min)	8.6	12.7	14.6	14.6	9.4
保护气体成分	75%氩气， 25% CO_2	100% CO_2	100% CO_2	100% CO_2	100% CO_2
保护气体流量/(m^3/h)	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4
CTWD①/mm	6.3	8.9	14~12.7	12.7	7.9
电压/V	19	23.5	23.5	23.0	20.5
电流近似值/A	190	250	270	270	200

① CTWD=电极尖端到工件的距离。数据来自于参考文献[184]。

2. 窄间隙熔化极气体保护焊的发展

早在1966年，窄间隙熔化极气体保护焊就被应用于焊接潜水艇的外壳[185]，到20世纪70年代中期，这种技术的一系列进展在日本得到了广泛的应用。

利用专门设计的焊枪，熔化极气体保护焊可以以窄间隙焊的方式连接厚度非常大的工件。这些新型焊枪与钨极气体保护窄间隙焊的焊枪一样，设计了叶片式的扁平焊枪，并配有加长的保护气喷嘴。为了减小钨极气体保护窄间隙焊中坡口侧壁金属熔化量不足的风险，尝试性地采用了如下措施：

1）焊道布置。通过精确地布置焊道的位置和采用如图9.6中所示的每层两道焊缝的技术，可以控制坡口侧壁金属的熔化。为了使焊缝成形更精确，每道焊缝结束以后都重新定位焊枪，或者采用两个独立的焊枪同时焊接。

2）改进焊接材料。焊接过程中可以采用高 CO_2 含量的保护气体提高熔化特性，但这通常也会导致焊接过程不稳定，产生大量飞溅。对于传统的熔化极气体保护焊焊枪，这种情况是可以接受的，但对于专门的窄间隙焊焊枪，则有可能导

致焊接操作问题。另一种改善熔池特性的方法是采用高氦含量的混合保护气体（氦气+氩气+二氧化碳+氧气）。人们发现，和富 Ar 的保护气体相比，高氦含量的混合保护气体具有更大的熔深，而且，如果 CO_2 和 O_2 含量得到精心控制，电弧的稳定性很好[186]，焊接接头的力学性能也比采用二氧化碳气体或者氩气+二氧化碳混合气体作保护气时好。

焊丝在坡口中的位置决定了弧根的位置，并会影响焊接金属的熔化缺陷。常规的熔化极气体保护焊所用的焊丝一方面天然的带有一定的弧度，同时自身还带有螺旋，这些会导致焊丝的随机性摆动。对于自动化焊接已经有专门经过矫直的焊丝可以使用，同时自动化设备中一般也配有某种形式的矫直机构，这些技术保证了电弧位置的稳定。但是现在有一种新的对送丝系统的改进，加强对焊丝螺旋程度的控制，从而使电弧在可控条件下进行摆动。目前这种技术已经开始被用于改善熔池特性。这种技术被称为电弧扭曲技术。它是将两根直径较小的焊丝制造成一根特殊的焊丝进行焊接[187]，其原理如图 9.7 所示。利用这种技术进行窄间隙焊接时，焊接头跟踪焊缝沿长度方向的中心线前进，坡口间隙宽度达到 14mm 时两边都能够产生足够的熔化。电弧摆动的类型可以通过改变相对焊丝直径、螺旋斜度和焊接参数来改变。

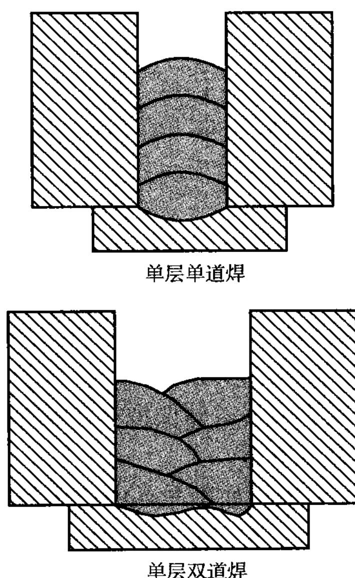


图 9.6 每层一道焊缝和两道焊缝的焊接技术

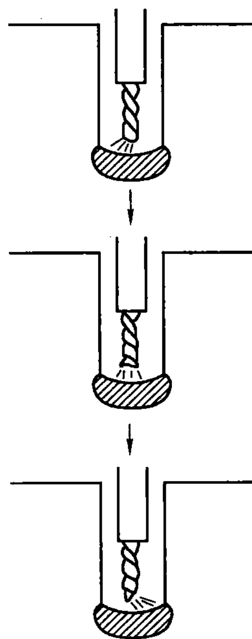


图 9.7 “螺旋电弧”窄间隙 GMAW 焊接技术

3）焊枪或焊丝的摆动。图9.8中的设计，可以实现焊枪的侧向摆动，或者，如图9.9中设计了一个和焊丝接触的特形管，通过旋转特形管可以使焊丝的端部产生圆周摆动。这些系统相对来说比较复杂，而且最小间隙宽度经常由于需要移动焊枪而受到限制。目前已经开发出了另一种可替代的焊丝摆动系统，当焊丝通过送丝系统时，会产生一个可控的变形。这一装置通过滚弯轮使焊丝产生波浪形或螺旋形的初始变形，从而产生可控的电弧摆动。尽管预置焊丝变形的原理可能非常复杂，但是深入坡口的焊枪部分结构紧凑，在间隙宽度为9mm的情况下仍能获得令人满意的接头。

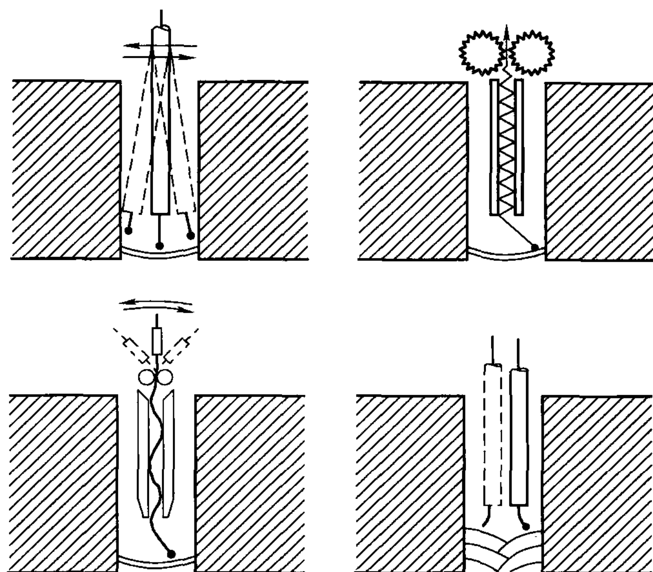


图9.8 窄间隙GMAW中的电弧摆动技术

4）焊接操作模式的改进。许多现有的焊接设备都采用了第7章中介绍的脉冲转移熔化极气体保护焊技术，以此来增加焊接过程的可控制性并减少焊接飞溅。

3. 窄间隙GMAW焊的应用

窄间隙熔化极气体保护焊已经应用于管接头和轴接头的环缝焊接，由被焊工件在焊接头下方旋转完成。除此之外，窄间隙熔化极气体保护焊还可以用于3.2.1节中介绍的管道全位置（5个自由度）焊接，另外还可以如图9.10[188]所示用于管道和柱体结构上水平接头的焊接，日本在这方面尤其突出。

在海上设施的建设中，人们对采用窄间隙熔化极气体保护焊完成垂直放置的传输管道的水平焊缝的焊接表现出兴趣。虽然这种应用已经被证实是可行的，但是仍需要对焊接参数和坡口间隙宽度进行仔细控制，以此来确保焊缝形貌和熔化

特性保持均匀。

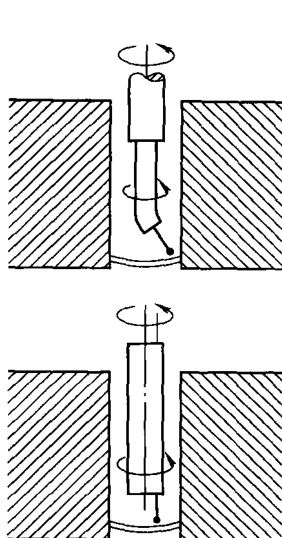


图 9.9 焊丝尖端旋转技术

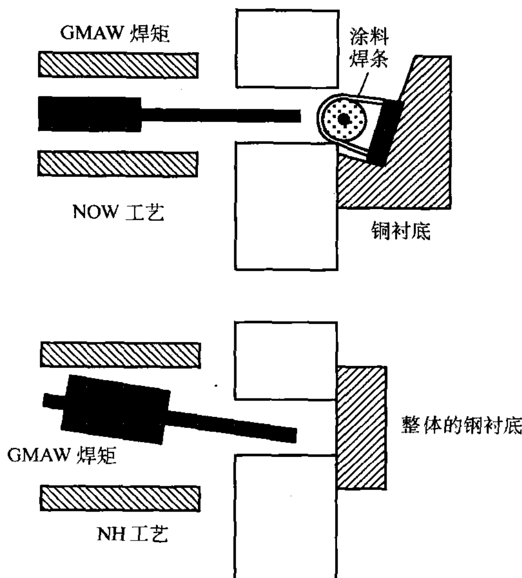


图 9.10 窄间隙水平焊接技术

9.3.3 窄间隙埋弧焊

窄间隙埋弧焊可以在厚板的平焊过程中生产高质量的焊接接头，而且能大大降低生产成本。传统的埋弧焊可以焊接相对较厚的材料（如 70mm 厚），但采用特殊设计的埋弧焊设备以窄间隙焊的方式可以焊接厚度高达 600mm 的材料。

1. 单层单道焊接技术

采用单层单道焊接技术，生产效率可能会高一些，但与多道焊模式相比，受到可能产生侧壁熔合缺陷、易形成焊渣夹杂和平均热输入过高等缺点的限制。然而，采用数学模型技术的研究工作[189,190]表明，即使利用传统的设备和单层单道焊接技术也可以通过工艺参数的优化，解决侧壁未熔合、咬边和夹杂等问题，可以完成的最大焊接厚度为 70mm。研究还表明，利用数学模型预测的焊接参数可以很好地控制熔池的几何形状，形成凹表面的熔池（有利于熔渣清理），形成最优的深宽比（阻止凝固裂纹）和最大的侧向熔深（防止侧壁熔合缺陷）。

2. 单层多道焊接技术

对于相同直径的焊丝，单层多道焊接技术要求具有更大的坡口间隙宽度（用 4mm 的焊丝做单道焊时，间隙宽度为 10mm，如果是两道焊则间隙宽度需要 18mm），因此完成焊缝的速度相对较低。然而，多道焊接技术确实可以有效控

制侧壁熔合、细化焊缝组织、改善焊渣去除和层间清理。由于上述原因，多数焊接都采用单电极和每层两道的焊接技术。典型的间隙宽度值和焊接参数[191]如表9.2所示。对于厚度超过100mm的材料，需要采用特殊的窄间隙焊枪。该焊枪通常呈矩形，附带焊剂送给装置、焊缝跟踪装置和焊枪高度控制装置。这种焊枪通常利用接触传感器来控制焊枪的高度，并采用视觉传感器来控制焊枪在间隙内的位置。窄间隙埋弧焊方法通常被应用在大型圆柱形结构的纵向和环向接头的焊接中。不论焊接上述哪种焊缝，都需要专用设备支撑焊枪。在环向接头焊接时，焊接过程中还需要工件在焊枪下旋转。焊接环向焊缝时，要特别注意防止被焊工件旋转时焊缝坡口的侧向波动，通常需要在转轴上安装反馈控制系统来测量和校正工件的位置。

表9.2　窄间隙埋弧焊参数[191]

坡口宽度/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（mm/min）	焊剂高度/mm
12	425	27	180	45
14	500	28	250	50
16	550	29	250	50
18	600	31	250	50
20	625	32	230	50
22	625	34	230	50

窄间隙埋弧焊中通常使用直径在3.2～4.8mm范围内的焊丝。焊丝过细，电弧容易出现随机性的偏移，特别是焊丝伸长较大时更为明显；焊丝太粗则送丝比较困难。窄间隙埋弧焊虽然可以利用标准的焊剂，但仍然开发了特殊成分设计的焊剂，可以增强脱渣性能。窄间隙埋弧焊时焊接极性一般采用直流正接或是交流。交流方式可以有效控制电弧的磁偏吹效应。另外采用方波形式的交流供电可以更好地控制焊接过程。

3. 窄间隙埋弧焊的发展

常规埋弧焊中用于提高生产效率和焊接过程控制的技术，几乎都可以应用于窄间隙埋弧焊过程，例如：

增加焊丝伸出长度。

双丝焊接。

热丝技术。

焊缝区添加金属粉末。

采用药芯焊丝。

虽然一些研究工作已经公开报道[192,193]，但这些技术目前尚未广泛应用。

4. 应用

标准的窄间隙埋弧焊技术（NGSAW）自20世纪80年代早期就被应用于很多领域[194]。其中的一些应用总结于表9.3中。这些应用包括焊接600mm厚Ni/Cr/Mo合金钢核反应堆容器和60mm厚海洋工程用管道。

表9.3 窄间隙埋弧焊的应用

焊缝类型	应用
旋转管环缝	海洋工程石油管道
旋转轴环缝	电站管状部件
	推进器轴
旋转厚壁容器	核反应堆容器

9.4 本章小结

在焊接中使用更窄的坡口间隙和减小坡口角度可以导致焊接生产效率的显著提高。一些焊接技术本身就具有窄间隙焊的特点，如电子束焊、激光焊、等离子弧焊、摩擦焊、磁控旋弧焊等，因而其应用可以自然发挥出窄间隙焊的优点。此外，适用于钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊和埋弧焊窄间隙焊技术也被开发出来。虽然焊接设备的成本较高，但采用窄间隙焊可以大大降低生产成本，总的焊接成本必须慎重考虑上述各方面因素。有报道[195]指出，用于焊接350mm厚的高压水循环加热器外壳的窄间隙埋弧焊设备价格昂贵，结构复杂，但其综合成本评估仍表明，开发并使用该设备是正确的。窄间隙焊具有足够经济性所需要的最小接头厚度与所采用的焊接方法及操作模式相关，如窄间隙钨极气体保护焊具有较高经济性时的最小接头厚度是15mm，窄间隙熔化极气体保护焊可以焊接15～22mm及以上厚度的接头，而窄间隙埋弧焊在接头厚度大于60～70mm被认为是适宜的。但是，如果采用常规的焊接设备，适于焊接的最小厚度值将下降直至与常规埋弧焊方法相当的厚度——12mm。焊接参数的优化和过程控制对避免窄间隙焊过程中的缺陷起到了至关重要的作用。较小的坡口间隙会给焊后修复带来难度，但可以通过良好的过程控制来避免焊接缺陷的产生。另一方面，窄间隙焊本身也可以看做是焊接过程控制研究的一种典型应用。

第 10 章 焊接过程监视与控制

10.1 引言

在任何制造过程中都有必要确保操作的结果能符合一些规定的目标。这就涉及采用一些措施控制制造过程的操作，如图 10.1 所示。

为了达到预期的输出必须做到：建立控制关系，使得控制变量对工艺性能的影响是可预测的；过程监视以确保它是在控制关系的限定下进行操作。

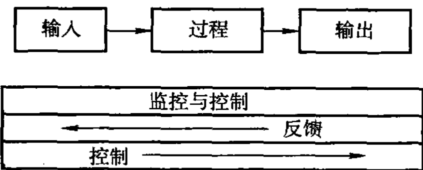


图 10.1 过程控制规律

和其他制造过程相比，焊接已经形成了一种更难控制，更不易于获得一致质量的名声。这可能是由于相关控制参数的多样性、控制关系的复杂性和工艺性能监视困难的结果。如果没有仔细的无损检验很难评估焊缝的完整性，没有对成品的破坏性试验也难以检测力学性能。国际质量标准也认识到这些困难，在 ISO 9000 中焊接被归类为一种特殊过程，对焊接成品所需要的控制方法在 ISO 3834 中有详细陈述。表 10.1 中给出了两种对比的电弧焊方法需要考虑的一些控制参数的指示量。

表 10.1 等离子弧焊与手工电弧焊控制参数的对比

手工电弧焊控制参数	等离子弧焊控制参数
焊条型号 焊条直径 焊接电流 直流或交流 焊条极性 焊条操作	电流，脉冲参数，电流上升/下降时间，电极极性，焊接速度，电极形状，保护气类型，保护气喷嘴尺寸，保护气流稳定性（气体透镜），保护气流量，电极伸出长度，导电嘴后缩，喷嘴形状，喷嘴孔径，离子气类型，离子气流，引导电弧电流

本章将概略描述传统的人工控制技术，并讨论工艺和设备发展的影响。控制参数的确定、监视技术和自动过程控制已取得实质性的进步，本章将详细描述这些进展。

10.2 人工控制技术

传统上，焊接过程通过为某一特定应用建立满意的操作环境来加以控制。这通常通过试错法，记录最满意的参数，然后在生产中使用这些参数。在有些情况下，留给焊工去理解不完善的图样，并建立满足设计要求的的条件，例如生产给定尺寸的角焊缝。

当需要进一步的控制时，即表明已经建立了焊接工艺规程。这是一种被认为能生产出所要求结果参数的正式记录，它用来指定能获得可重复的焊接质量所必须的步骤。工艺规程控制已经成为生产高质量接头的可接受的方法。

10.2.1 正式的焊接工艺规程控制

正式的焊接工艺规程控制需要做到以下几点：

1）建立满意的操作参数（工艺规程设计）。

2）进行工艺规程的验收（工艺规程评定）。

3）在实践中遵循可接受的工艺规程（工艺规程管理）。

1. 工艺规程设计

焊接工艺规程设计包括：选择最适合的焊接工艺；确定合适的焊接参数组合；评价接头样品的性能；当测试结果不能满足要求时的参数修正。这些因素在下面讨论：

1）焊接方法的选择。焊接方法的选择取决于接头的材料、厚度及焊接位置。在大多数情况下会有几种方法能满足应用的基本要求，最后的选择将取决于实际考虑（比如设备和操作工人的条件）、规范（见下面）和经济性产生的限制。焊接方法选择将决定需要考虑的控制参数数目和控制关系的性质。现在已有了为简化焊接方法选择而设计的计算机软件[196]。

2）焊接参数的确定。焊接参数包括为保证可重复的性能而需要指定的所有变量㊀。这除了包括工艺控制参数如焊接速度、电压和电流等，还可能涉及接头设计、清洗和坡口加工、预热和焊后处理等。

也许某种应用需要一种特定焊接结构，但通常还需要规定平板准备的细节。既定的接头外廓可以从已出版的文献[197]和焊接规范中得到。这些规范针对被标准涵盖的具体应用提供已经测试过的“安全”准备细节。它们提供了一种接头设计的简单方法，但在一些情况下，它们可能限制工艺和接头轮廓的选择。即使是使用这些推荐的接头设计，往往仍需要评定工艺规程，特别是准备采用新工

㊀ 这些参数经常指“基本变量”，如果它们偏离可接受的容许范围，则需要重新评定工艺规程。

艺/新技术时。

工艺控制参数也可以通过参考已出版的数据、预先评定的规程或者规范和标准来确定。否则，需要通过焊接试验确定合适的参数、操作的容许范围及最佳的焊接条件。在这个阶段，选择的方法和参数的组合必须能够可重复地生产出高性价比的满足规定质量的接头。选择焊接方法时必须考虑要避免潜在缺陷，因为这会在很大程度上影响焊接材料、操作参数、预处理、焊后热处理和检测的选择。

这些需要考虑的问题由材料的焊接性决定，如表10.2所示。在结构钢的情况下必须考虑氢致或氢诱导冷裂纹（HACC/HICC）的可能性。所幸的是，避免热影响区（HAZ）氢致冷裂纹[⊖]的安全工艺规程标准的规则已经良好地建立起来，而且包含在大部分国家标准和国际标准中。这些标准规范了控氢填充材料的要求，并能从钢的化学成分或者碳当量及材料结合厚度的知识中确定预热和热输入的要求。工艺设计的结果是正式的焊接工艺规范（WPS）或者建议，其中可能包括一个简单的列表，更常见是印制的表格（图10.2）。在这个阶段，工艺规程是一种“建议”，尽管它参考了类似的应用，但是它未经试验验证或者未经评价。

表10.2 材料焊接性对工艺影响的典型例子

材　　料	可能出现的问题	影响因素	控　　制
碳锰钢和低合金钢	氢诱导或氢致冷裂纹	微观组织，应力，拘束	材料碳当量，焊条类型（低氢），热输入，冷却速度，预热和后热
碳锰钢	层状撕裂	板材杂质含量，沿板厚方向的应力	材料检验，正确的接头设计，避免沿板厚方向的载荷
铁素体钢	气孔	氮气（从空气中）的存在，一氧化碳的产生	使用具有足够强还原性的材料和提供充分的气体保护
奥氏体不锈钢	碳化物析出	材料成分，焊接热循环	选择热稳定性强的或低碳含量的钢材，控制焊接热循环
奥氏体不锈钢	焊接热裂纹	焊缝填充材料的成分，热输入量	控制焊缝填充材料中铁素体含量

⊖ 虽然热影响区氢致冷裂纹的产生机理已经完全清楚了。但随着更高强度钢材的使用，焊缝金属氢致冷裂纹的倾向增加了，控制焊缝金属氢致冷裂的规则将更复杂，并仍在研究中。

焊接工艺规范

项目	焊接工艺规范编号	修订版次	页码

焊接代码
焊接工艺
边缘准备
接头类型
接头位置
绘制参考

批准
制定人
委托人
审核

接头细节 焊道顺序

接头容差

尺寸		细节
根部张开	R	
根部表面	F	
坡口角度	OC	

材料说明

等级
厚度
限制范围

热处理

焊前热处理
最高层间温度
焊后热处理

多道焊			电极信息			熔渣/气体	焊接参数				层间温度	热输入/(kW/mm)
道次	尺寸	方位	类型	尺寸	规格		电流	电压	极性	焊速		

试板辨别	熔化极信息	无损检测
标识	干伸长	视觉
焊工	保护气体	磁粉检测
序号	熔渣	射线
日期	焊条	超声检测

说明
准备人

图 10.2 典型的焊接工艺规范表格

3）接头性能的评价。为了测试工艺规程能否生产出所要求的接头特性，需要对采用指定参数焊接的接头样品实施力学性能测试和无损检测。

4）工艺规程的修正。如果指定的工艺规程不能产生所要求的结果，需要不断重复过程并修正焊接参数。

2. 工艺规程评定

正规的工艺规程评定包括按照认可的焊接工艺规范完成样品接头，这经常是在客户或者独立认证机构的监督下完成。所焊的接头要接受指定的无损检测和力学性能测试。测试的结果按工艺规程评定记录（PQR）进行报告，如图 10.3 所示。

焊接工艺规程评定

项目	焊接工艺评定编号	修订版次	页码
焊接代码		批准	
试验代码		制定人	
拉伸 硬度 韧性 弯曲	无损检测	委托人 审核	

无损检测			宏观检查		
试验	结果	报告	试验	结果	报告
视觉 磁粉检测 着色检验 超声检验 射线检验			外观轮廓 焊脚尺寸		

拉伸试验

类型	试验编号	区域	延伸率(%)	断面收缩率	屈服强度	抗拉强度	评价	报告

硬度测量						弯曲试验			
横截面	母材	热影响区	焊缝	评价	报告	类型	制样人	结果	报告

韧性试验

类型	编号	温度	结果	报告

试板辨别	说明
标识 焊工 序号 日期	

图 10.3　典型焊接工艺规程评定记录

焊工的技能通常是决定最终焊接质量的主要因素。焊工的技能可以利用一般的认证方法进行评定和修正[198]。有时也可能需要对指定焊工进行认证，以实施某一个特定工艺规程。

3. 工艺规程管理

使用这种技术的焊接工艺管理规程包括：工艺规程和评定记录的维护；焊接及辅助设备的标定；监控对工艺规程的遵守。

1）维护工艺规程记录。建立一个满意的工艺规程和获得合格的工艺规程后，有必要维护焊接参数及所用技术的记录，并需要控制在车间中执行这类信息以保证获得一致的接头质量。在很多情况下，特别是在小批量成品生产时，将不定期需要这类信息。当投标一项新工程，为新任务准备工艺规程或者分析生产问题时，也需要有焊接工艺规范记录。制造者会很快地形成一个大型的工艺规程库，所以很有必要建立一个合适的系统来存取。为了减少副本和改进工艺规程数据的存取，许多公司现在使用计算机数据库系统来进行工艺规程的管理[199]。

2）参数的有效性和设备的校准。工艺规程的有效性取决于建立同样操作条件的可能性：采用规定的参数，由不同的操作者在不同的工位使用指定型号的设备和耗材。如果指定的参数模棱两可或者定义不好，结果焊缝可能比在工艺规程设计阶段所完成的焊缝差。

例如在气体保护焊中，当电压作为一个控制参数时，记录的电压应该是尽可能靠近电弧处测量的电弧电压。开路（或空载）电压值更容易测量，但除非电源的静特性也是指定的，否则它毫无意义。此外，由于在较高电流下焊接电缆中可能有较大的电压降，电源面板表所显示的电源输出端的电压，往往高于电弧电压，这种差别受电缆长度和直径变化的影响。就焊接耗材来说，应该根据定义了成分限制和性能的国家或国际规范来选用，而不是根据商品名称来指定（在一些情况下，用户可能需要对性能和成分增加指定的限制）。

应该指定电参数的测量方法［例如，方均根法（RMS）还是平均法］，而且在某些情况下，还需要指定设备型号和测量技术[200]（见下面10.3部分）。

工艺规程变量的容差应该适当考虑设备的能力和限制来指定。例如，新设备将按照制造标准来校准，但允许的容差往往相当宽；对大多数设备，显示值的±10%的容差值是允许的，但设备之间设置的可重复性无法保证。现有设备的校准也很难。例如就简单的手工电弧焊设备而言，控制部分经常由于磨损而仅有较差的评分[201]。在熔化极气体保护焊情况下，合适的设备仪表经常在正常的焊接环境中被破坏而恶化，无法用于校准的目的。

另一个误差来源是在电源输入方面，输入电压可能产生高达±10%的波动，常规焊接电源的输出也会随之发生变化。然而，现代焊接电源通常采用了输出稳定装置，避免输出受不可控输入电压波动的影响。此外，正如第3章所讨论的，

这些电子焊接电源通常能获得更高的精度和重复性。

综观上述问题，很有必要使用已知精度的外部设备对关键焊接工艺规程所要使用的设备进行检测。校准的级别由应用决定，建议采用双层系统[202]，这是实际应用所建议的规范的主题。该系统包含两个级别：

级别1：焊接电源设计标准所要求的校准精度的标准等级。

级别2：这一更高或更精确的等级用于需要更高精度的场合，如核工业的接头、机械化、轨道和机器人焊接系统。

每一个级别的任务需求见表10.3。

表10.3　校准要求

参　数	级别1	级别2
电流	±10%	±2.5%
电压	±10%	±5%
上升/下降时间		±5%
脉冲时间		±5%
测量仪器	±2.5%	±1%
送丝速度		±2.5%
校准频度	1年（最大）	0.5年（最大）

不仅是焊接设备需要校准，在手工电弧焊情况下，焊条的温度控制也可能很重要，所以需要校准焊条的烘箱。当涉及预热和焊后热处理时，需要考虑检查热处理设备和测温装置的稳定。在机械化焊接过程中，系统的行走速度和位置精度需要定期检查。

3）工艺规程监控。工艺规程一旦被接受，就必须监控焊接生产过程，以确保遵守工艺规程并获得要求的结果。传统上，焊后成品采用无损检测技术（例如，X射线、超声波、磁粉检测和染色渗透法）来检查焊接质量，如果有必要，还要清除接头缺陷，修复接头。然而，生产早期的逐级监控，能够避免最终检查之后的成本高昂的返修工作。例行线路监控应该至少包括检查关键的工艺规程变量（例如电流、电压、送丝速度、温度、焊接材料处理、焊接行走速度）。利用下文详细描述的监控设备可以实现更好的控制。

使用按照可追踪的校准标准的便携式监视设备是确保使用最佳参数的有效方式，在工艺规程评定阶段使用同样的装置尤其有利。实际上，虽然精确的高质量模拟仪表也可以用于这种目的，但不如数字仪表稳定。然而，数字仪表的使用必须谨慎，特别是当所测量的参数既不是恒定的直流也不是纯正弦交流波形的时候。现在的许多监视和校准仪器都含有一个能提供永久焊接参数记录的计算机数

据记录器，还能将数据传送到计算机上永久保存（这些系统将在10.3.1中全面描述）。

10.2.2 小结：焊接工艺规程控制

焊接控制可能是一个非正规的过程，只由焊接工程师或焊工评价要求和选择合适的焊接参数，也可能采用一个更正式的方法，需要测试焊接工艺规程的适用性，并归档。

采用正规的焊接工艺规程的传统控制方法取决于以下几点：

1）通过工艺规程试验和测试，建立并验证令人满意的焊接参数。

2）在生产过程中保持同样的参数。

3）利用最终的检测和无损检测（NDE）进行监控。

4）通过修理和返工纠正错误。

如果所有过程的输入保持不变，就假定可以获得满意的可重复的输出，也就是满意的焊接质量。

直到最终检查之前，过程中的任何能引起质量恶化的输入误差或扰动可能都不会被注意到。由于不直接利用输出质量来控制过程，所以可以认为这是一个开环控制。控制环通过人工介入校正误差的形式实现闭合，但这经常是焊接完成后才实施，而且唯一的校正手段是返修。

在这种方式下，全面评价和认可一个工艺规程是耗钱耗时的过程，通常只有在必须达到特定接头质量要求时才是合理的。然而，在很多情况下需要用这些技术来获得衡量控制的恰当标准并满足质量保证要求（这些技术可能需要得到贯彻和执行，以满足如ISO 3834，ISO 9000 EN 29000等质量标准体系的要求，或管道、压力容器、桥梁等特殊制造标准的要求）。

10.3 监控

测量焊接参数和校准设备对于应用任何控制方法都是十分重要的，正规焊接工艺规程控制的要求在上面已经讨论过了，但是适宜的监控方法也是任何自动化控制系统的先决条件。焊接过程监控方法已经得到很大的改进，一些可用的技术将在下面讨论。

10.3.1 焊接参数与测量技术

这些技术将按以下标题进行讨论：

1）传统仪表。

2）基于计算机的仪器。

3）焊接参数的监控。

4）稳定性监控。

5）动态电阻测量。

6）偏差监控器。

7）视觉系统。

1. 传统仪表

模拟与数字测量。不论是模拟技术还是数字技术都已经用来测量焊接参数。

在模拟系统中，要测的信号转换成某种形式的指示度，该指示度随输入信号连续变化。在模拟仪表中，输入电压可以通过电磁作用转化成指针的偏转。另一种方式，对于快速改变的信号，指针可以是通过示波器[⊖]的偏转线圈来扫描阴极射线管屏的一束电子。模拟测量技术给出了一个很好的参数变化率的可视化指示，而且在评估方法稳定性时很有用。当被测信号随机变化时（例如在手工电弧焊中测量电流），模拟测量技术也可以给出一个很好的平均输出水平示值。通过读取标定过的刻度可以实现定量测量。这类仪表提供的示值是连续的，其分辨率取决于刻度和读数的仔细程度。为提高精度，仪表的显示系统需要做得很大，但对于常规的系统，这意味着相当沉重的机械运动而降低了仪表的响应速度。为了实现指示值的永久记录，需要在纸上或者胶片上记录指针的运动。这可以通过一条不断移动的记录媒介来完成，在媒介上的记录标记可由移动的电位小车上携带的笔或者是由电流计将光束偏转到光敏纸上来实现。

在数字测量系统中，模拟信号显示前被转换成预先定义范围的数字。仪器的分辨率取决于所用的模数转换器（ADC），8位转换器可提供256级的分辨率，而12位转换器能提供4096级分辨率；16位转换器能实现66536级的分辨率。

如果仪器的满量程的读数是256V，一个8位模数转换器的分辨率是1V，而一个16位模数转换器的分辨率是0.004V。对于许多焊接应用来说，8位精度就够了，特别是在信号已被调理到满量程的限度内时。数字测量系统的一个优势是能提供直接的数字输出，并能如后续所描述的那样进行电子存储或记录。数字系统一般比模拟仪表更精准，但有时易受电气干扰影响。数字方法的缺点是：如果所测的参数快速波动而“平均”值可由几种不同的方式获得（例如通过输入信号的电子处理或者通过计算），那么就很难获得精准的瞬时值。这可能导致不同数字仪表的测量值的轻微差异，而且当与传统模拟仪表测量值相比较时可能有很大的不同。

⊖ 示波器给出了规律的、周期性变化信号的幅度和频率，但是对于瞬变或无规律的信号，需要使用单点仪器如后面描述的基于计算机的系统。

2. 基于计算机的数据记录器

一般过程控制和生物医学应用中的基于计算机的数据记录器最初仅用于焊接研究应用中，但是现在为焊接过程标定和控制这一特定目的而建立的监控器也唾手可得[203]。

基于计算机仪器的原理如图 10.4 中所示。待测的模拟信号经由一个包含标准电子元件的信号调理电路放大或者衰减。这个部分的输出可能经隔离放大器实现与仪器的其他部分的电气隔离，并使用硬件滤波器减少电气噪声。测量焊接过程中的高电压信号时，隔离尤其重要，这时一般会伴随共模问题的出现⊖。共模技术也可以用于低电流或低电压信号（如来自热电偶的信号）监测中，以避免虚假信号。

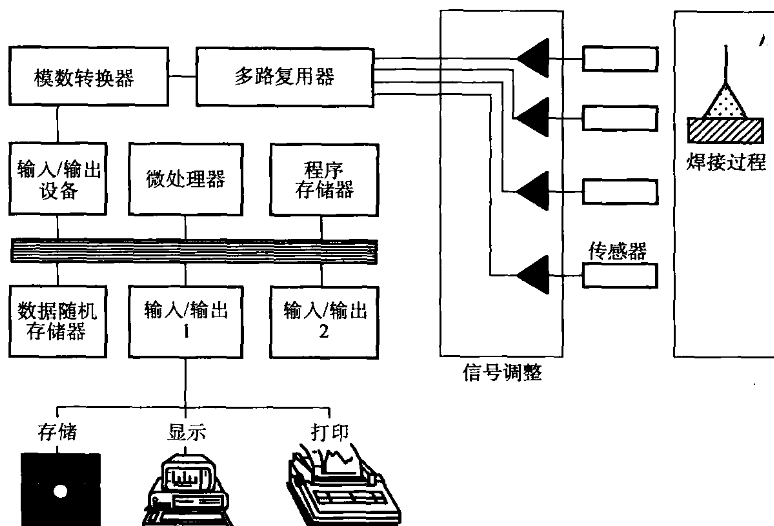


图 10.4 基于计算机仪器的原理

模拟信号数字化，依靠一个与数字仪表中类似的 ADC 转换器。假定输入已经缩放到合适的大小，使用 8 位的 ADC 转换器就能够满足许多焊接应用。为了提供监测多个焊接参数的功能，在通过 ADC 之前由一个多路转换器扫描几路已调理的模拟信号。

ADC 的数字输出量以由微处理器的时钟频率和控制程序共同确定的速率被采集。一系列的程序参数和操作参数存储在程序存储器中（通常是 EPROM），

⊖ 共模问题：在同时测量焊接电流和电压时，很有可能将仪器直接短接在焊接电源的输出端。大电流可能意外地通过连接的引线，或更严重却更隐蔽地通过与仪器连接的地线或大地。这种失误可能造成焊接测试仪器的严重损坏。

可以为特定应用选择适当的采样条件。微处理器也决定着数值储存在什么地方，怎样处理，是否在某些内嵌显示器上显示，或者传送到另外的装置加以储存或显示。这类系统能以每100ms或甚至更快的速度读取输入电平的瞬时值。这些瞬时值可以储存在RAM中，也可以像示波器再现输入信号波形那样加以显示。不同之处在于数值已被储存并能被重复阅读。数据也可以转移到非易失性存储器（例如软盘，带后备电池的RAM，磁带等），借助于打印机或绘图仪可获得波形的硬拷贝。在更复杂的系统中，数据可通过以太网、互联网或者现场总线传输到远程位置。

为了避免波形表示不精确（常称为“失真”），采样频率至少应该为所测波形的十倍；若采样间隔100ms，即采样频率是10kHz，信号频率低于1kHz时波形表征才是准确的；尽管研究高速瞬态事件时需要更高的采样速率，但上述10kHz的响应，在脉冲钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊中常见焊接波形的一般评估中，还是相当合适的。

存储器中的焊接波形可在显示器上显示和分析。一些仪器能够执行波形运算，并显示脉冲参数的离散值。然而，所获数据的数量受到可用内存的限制，在高采样频率下，随机存储器会很快被装满。如果不需要与波形相关的细节信息，则输入信号可实时处理，并且数据文件也更简短。在焊接应用中使用的两项通用技术是事件监视和派生数据存储。

事件监视技术中，只记录满足某一规则的波形瞬态特征数据。一个常见的应用就是在熔化极气体保护焊中记录脉冲或短路电流峰值。先预设一个电流阈值，只记录超过这一阈值的电流幅值。每次电流上升超过阈值，就保存事件的时间、幅度和持续时间。由于只是捕获了感兴趣的事件，这些现象的相关数据被压缩，所以可在更长的采样时间段中得到大量的有关信息。这类系统用于稳定性分析的应用在3.1.2节中阐述过。

在测量过程中，原始数据的信息也可以通过运算加以压缩，且只保留结果。例如每一千次读数能获得诸如平均电流和电压的派生数据，之后可以删除原始数据而只在RAM中存储平均值。此外，二次处理的参数，如热输入或动态电阻，也可以采用这种方式在线计算。

已经设计了专用焊接数据记录监视器用于监测电弧电压、电流和送丝速度，并具有波形采集和分析的功能，能够监测每次焊接的平均值。在采集波形时，采样频率可以变化且具有预触发功能。焊接数据记录监视器所采集到的结果可直接输出到：

1）一个外部的示波器，进行波形的综合分析和测量。

2）内部的显示屏，能给出示波屏上可移动的光标所对应的电流或电压值读数。

3）内部打印机，可打印计算所得出的电流和电压的峰值与基值、峰值和基值的时间及平均电流和平均电压。

4）用可移动的带后备电池的RAM盒或“大拇指盘（一种闪存盘）”来储存数据，并将数据转移到个人计算机上，以便进行更详细的显示和分析。使用这个功能，所测数据可以用于焊接工艺规程、焊接成本计算，或者与预定工艺规程的测量值相比较。

这类便携仪器在焊接应用中提供了一种有用的校正、监视和解决问题的方法。这些系统既可以在焊接监测完成之后提供信息，但是所用的技术也可以用于永久数据记录和后续章节将介绍的实时控制。

最近发展的低成本的基于计算机的遥控数据记录器，使得在焊接环境下记录焊接参数成为可能，并在带后备电池的存储器中存储数据，通过高速串行连接（USB）、以太网、互联网或工厂总线系统（如现场总线或CAN总线）下载数据来查询结果。像这类的系统已经用于焊接热影响区热循环的测量、焊枪热测试及监视电流和电压[204]。随着用于个人计算机的高速模数转换卡的性能提升，有可能研制出适合于研究、生产和质量监控等方面应用的柔性的高性价比的专用焊接数据记录器[205]。嵌入式处理器的应用也使得开发基于计算机的极低成本现场仪器成为可能。

3. 常规焊接参数的监控

1）温度。焊接中出现的高温可用温度指示涂料、有色粉笔、可熔指示剂、双金属温度计、热电偶、红外温度计或者热成像来测得。

温度指示涂料和粉笔可根据材料表面温度的变化相应地改变颜色。它们便于现场使用，但是它们的精度在一定程度上取决于其应用的仔细程度和对颜色的解释。

可熔性指示剂在达到预设的温度时熔化或者改变形状。它们给出了已经达到某一温度的清晰的指示，但是在加热和冷却循环期间它们很难给出材料的实际温度值。

双金属温度计是依赖于双金属条温度效应的接触装置，金属条的变形通过特定机构转换成指针的运动。温度的指示是连续的，容易读出，但精度往往不到满量程的10%。

更精确的温度测量方法包括使用热电偶作为传感器。热电偶的接合部会产生一个与温度成比例的微小电压，该电压可由模拟仪表直接测量，或者数字化后直接显示，或者储存为永久记录。电热调节器或热电阻也能够产生与热电偶相似的输出信号，但在焊接及其相关过程中，所可能产生的温度范围更适于采用热电偶）。来自热电偶的信号通常很微弱，需要放大；此外，需要对热电偶冷端的温度进行校正，电流信号也必须转化为温度读数。这些功能很容易靠电子实现，由

于大多数温度信号变化相对缓慢，数字仪表经常能提供方便的输出显示。

通过探测材料表面的红外辐射可实现非接触的测量，热成像摄像机测量可给出感兴趣区域温度轮廓的指示。然而，这些装置的成本相当高，目前条件下其应用仅局限于研究和自动化传感系统。

2）电流。示波器上可显示瞬时电流值，可查看交流和直流的波形总体形状。然而，示波器放大器的输入通常标定为 V/cm 级，输入的最大值经常在5V/cm左右。为了把焊接应用中常规的大电流转化成低电压信号，通常使用下面装置之一：电流分流器，电流变压器或者霍尔效应探测器。

电流分流器是个大功率、低阻值的电阻，它被串联于待测电流流过的电路中，能够产生与流过电流成比例的低电压信号（如50～200mV）。可是电流分流器只适合测量变化较慢的波形，因为大多数分流器存在固有电感，限制了信号变化速率并使观察到的波形变形。分流器的电阻热也可能导致测量不精确。为了提高响应速度和精度，开发出了采用水冷的无电感分流器，但是其成本通常较高，且应用不方便。

对于交流波形，可以使用电流变压器将输出减到合适的水平。尽管有低成本的钳式结构，但通常采用套在传输被测电流的导体上的圆环和线圈的形式。然而，这些装置对快速变化的波形也会产生变形。

霍尔效应探测器是基于对电流通过导体时所产生的磁场作出响应的半导体元件。它们能探测和指示直流与交流，并且频率响应非常快，所以能够用于探测快速变化波形的瞬态现象。

然而，示波器的使用通常局限于研究和焊接设备的维护。对于生产目的，往往需要大量的电流单值测量。稳定的直流电流可用模拟、动圈式仪表和数字式仪器测量。对于直流电流来说，所指示的值可以是稳定的直流值，或者，对于起伏波动的直流电流波形，是平均值。模拟动铁式仪表指示的是波动信号的算术平均值。图10.5为波动电流波形的平均值。

即，
$$I_m = (I_1 + I_2 + \cdots + I_n)/n \tag{10.1}$$
式中，I_m 是电流波形平均值；$I_1 \sim I_n$ 是有规律间隔的电流值；n 是测量值的编号。另外，平均值也可以由曲线包围的面积除以沿 x 轴所测得的等量时间长度获得。对于矩形波的平均值为
$$I_M = (I_p t_p + I_b t_b)/(t_p + t_b) \tag{10.2}$$
式中，I_p 是峰值电流，I_b 是基值电流，t_p 是峰值时间，t_b 是基值时间。

然而对称交流波形的平均值为0，而它的效应可由能产生当量电阻热量的恒定直流值来度量。这个值被称为 *RMS*（方均根）电流，定义为
$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2}{n}} \tag{10.3}$$

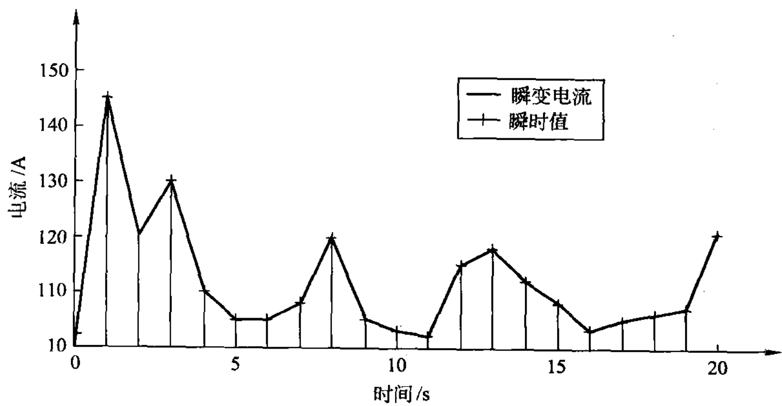


图 10.5 波动电流波形的平均值

另外，交流也可经过整流得到直流波形的平均值，这个值称为是平均绝对值（*MA*）。对于恒定直流和对称方波，电流平均绝对值等于 *RMS* 值，但对于其他波形，这些值不相等。例如纯正弦波，其 *RMS* 值是 1.111 × *MA*㊀。对矩形波来说，*MA* 和 *RMS* 值有本质的不同[206]，如表 10.4 所示。要进行设备或工艺的比较时，指定测量电流时所使用的方法和采用相同的技术非常重要。

表 10.4 矩形波电流平均值和 *RMS* 值的差异

脉冲电流/A	基值电流/A	占空比	*MA* 值	真 *RMS* 值/A	比例 *RMS* 值①/A
600	0	1/1	300	424	333
550	50	1/1	300	390	333
500	100	1/1	300	360	333
450	150	1/1	300	335	333
300	300	1/1	300	300	333
600	0	1/3	150	300	167

① 比例 *RMS* 值是低成本仪表采用平均绝对值换算 *RMS* 值的典型读数。

3）电压。焊接中所用电压在用示波器或者模拟、数字仪表测量前都要经过衰减。然而，大多数仪表系统都能够对待测电压的常规水平作合适的衰减。由于会遇到与上节所述电流测量相类似的不同波形或仪表的差异，电压测量时同样必须指定测量系统和仪器类型。测量电源输出的最简单的方法是用安培表和电压表

㊀ *RMS* 值除以电流平均值就是所谓波形因素，如 1.111 为纯正弦波的波形因素。峰值电流除以 *RMS* 值即为峰值因素或波峰因素。波峰因素越高，平均绝对值与 *RMS* 值之间的差异就越大。译注：*RMS* 值也就是有效值。

或者混合仪表。这可能包含霍尔效应的电流传感装置和数字电压表。

4）速度和时间。线性行走速度和送丝速度常通过测量行走一定距离或者送丝长度的时间来获得，也可以使用电子的或机械的转速计来测量。但这需要将线性运动转化成旋转运动。已经有一些适用的传感器可供选择，通常使用开槽的盘式光学转速计或者小型直流发电装置。直流发电装置所产生的电压可在模拟或数字仪表上显示，对于开槽的盘式编码器来说，将频率脉冲转化成旋转速度也很容易。

4. 稳定性监控

监控熔化极电弧焊过程时，过程稳定性的测量是操作中所关心的。它可以用来评估生产中的工艺性能，也可以帮助耗材和设备的研发。

常规手工电弧焊和熔化极气体保护焊工艺的操作性能虽然可以通过由有经验的焊工实施的焊接试验来评价。但这些主观性评价不但需要相当的技能，也很费时间，结果还经常不一致。稳定性的客观测量可通过检查不同操作参数的统计变化规律来获得。目前已经建立了大批的稳定性判据[204~218]，表10.5列出了其中的一部分。

表10.5 稳定性判据

判　据	应　用	参考文献
$C_{crit}=S^2/X_m^2$	CO_2 气体保护焊	[204]
如上，但使用电流峰值的偏差	交流手工电弧焊	[205]
$R=w/W$ 和 i/I	直流电源评价	[206]
$K=\dfrac{T_m}{\sigma_T}$	熔化极气体保护焊时的元件更换	[207]
电流峰值的标准偏差	通用监控	[208]
K 因素（如上）	不锈钢熔化极气体保护焊的保护气评价	[209]
燃弧时间的标准偏差	碳钢熔化极气体保护短路焊的保护气评价	[210]
短路和燃弧时间的概率分布	CO_2 气体保护焊	[211]
燃弧和短路时间的统计分析	熔化极气体保护焊飞溅大小分析	[212]
$\dfrac{\sigma_{tarc}}{t_{arc\text{-}mean}}$	熔化极气体保护焊短路过渡	[213]
$W_s=W_a+W_r+W_p$	熔化极气体保护焊	[214]
短路时间统计分析	手工电弧焊和熔化极气体保护焊	[215]

注：S 为在电压通道上所测的短路之间的时间的标准偏差。X_m 为短路之间时间的平均值。w 为在熔滴刚刚过渡之后的燃弧期间的最小功率值。W 为在稳定状态下的功率平均值。i 为电流的最小值，I 为在稳定状态下的电流平均值。W_a 是基于燃弧时间、短路时间、电弧电流和峰值电流标准偏差要素值的稳定性判据。W_r 是基于燃弧期间所测电阻和平均电阻间比率的稳定性判据。W_p 是基于燃弧期间所测功率和平均功率间比率的稳定性判据。T_m 是平均周期时间，σ_T 是周期时间的标准偏差，σ_{tarc} 是燃弧时间的标准偏差，$t_{arc\text{-}mean}$ 是平均燃弧时间。

在短路过渡熔化极气体保护焊中，燃弧时间的标准偏差、峰值电流的标准偏差和燃弧时间与短路时间的比率能很好地表征稳定性，并且这些很容易由基于计算机的仪器测得。图 10.6 显示了两种名义上类似的熔化极气体保护焊耗材的燃弧时间直方图。显然，如燃弧时间更低的标准偏差所指示的耗材稳定性更好，具有更好的操作性能，更低的焊接飞溅率和更好的焊缝成形。

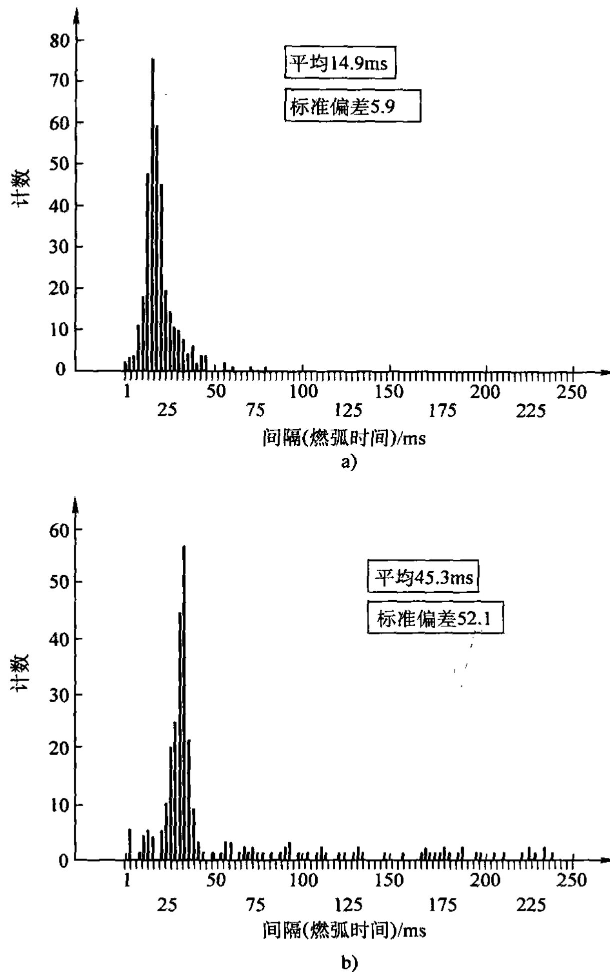


图 10.6 好焊丝 a）和差焊丝 b）短路过渡熔化极气体保护焊燃弧时间的直方图

尽管这类监控器已经成功地用于研究领域，但商业用稳定性仪表却几乎没有生产。一定要记住，电弧稳定性尽管重要，却可能并不是焊接质量评价的主要判据。例如在熔化极气体保护焊中，如果能够提高熔化特性，最佳稳定性是可以被牺牲的。当然，从另一个角度看，使用这种测量来探测操作性能上的不可接受偏

差的可能性有着有益的前景，并可能用于如下讨论的在线质量监控系统中。

5. 偏差监控器

1）动态电阻。电阻点焊质量受到待焊板表面条件、电极磨损、电极压力波动、电流分流和焊接参数瞬态变化的影响。为了检测这些变化的影响，已经提出了几种监控点焊质量的方法，但动态电阻技术可能最适合工业应用[219, 220]。在这种系统中，通过测量瞬态焊接电流和电压的值可以计算电极间金属的电阻。如果采用基于计算机的技术来采集数据，焊接完成后能立即在监视器屏幕上绘出生成的动态电阻曲线。一个令人满意的普通碳钢点焊的正常动态电阻曲线如图10.7所示。该曲线可分成三个区域：

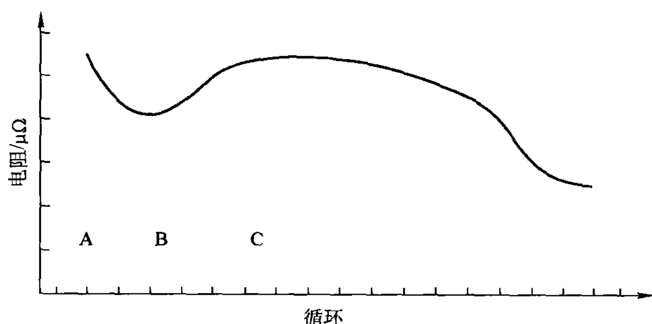


图10.7　普通碳钢点焊的正常动态电阻曲线

A区：与接触电阻减小阶段相对应的区域。

B区：与电阻加热并且材料电阻率增加阶段相对应的区域。

C区：与材料厚度减少和焊点熔核增长伴随电阻稳定减小阶段相对应的区域。

曲线形状的变化表明，对于正常的焊点熔核形成，上述曲线偏离到一定程度，就形成有缺陷的焊点。一种基于计算机的动态电阻仪器[221]能够以下列方式用于监控电阻点焊工艺的性能。

将监控器设置到“测试”模式下，设置焊接参数、焊接测试的样本。用目视和破坏性测试检查焊接试件，如果获得了令人满意的焊点，则将所得到的对应的动态电阻曲线存储为该应用的模板（如果焊点不令人满意，则调整参数重新测试）。当设备切换到“监控”模式下，后续焊接的动态电阻曲线与模板曲线相比较，偏差超过预设极限就会提示，通常用于启动警铃，甚至打印“不合格”标签。此期间也将焊接电流、电压和时间与对应的预设值相比较，以确保能获得令人满意的容差。

所记录的焊接参数可存储在监控器的存储器中，所测得的数据可储存在非易

失的存储装置中（如软盘）。这类设备能配置为一系列安装在单台焊机上的本地监控器，把收集的数据反馈到中央计算机作永久保存或分析。这类分布式的基于计算机的动态电阻监控器，适用于自动化系统和机器人焊接站的在线监视[222]。

2）弧焊偏差监控器。弧焊过程可用类似10.3节中所述的技术进行监控，然而这种情况下通常需要监控连续焊缝而不是离散的点。一个适用于自动熔化极气体保护焊质量保证的、基于计算机的装置，可测量电弧电流和电弧电压信号，其中使用了用于导出短路电阻的模拟电路和电压波形的射频（RF）成分[223]，并通过将样本数据和电压、电流、RF成分和短路电阻的预设极限相比较来分析数据。为了允许持续不断地更新采集的数据，四个输入通道以大约15kHz的频率采样，在线分析数据。在常规的短路过渡熔化极气体保护焊接操作中，以相当于每次增加2mm焊缝长度的增量存储评价结果，传输到外部计算机或者用于启动焊接质量信号。采用实时分析并依据被监控的变量与潜在的焊缝缺陷模式间的相互关系知识[224]，弧焊偏差监控器可从前述有限的输入数据中预测大量的焊接质量偏差。例如，电弧的电阻可用来指示焊枪与工件之间距离的变化，而电阻满足要求但电压过高可能预示着送丝问题。电压波形的高频成分用来指示过程的稳定性，特别是气体保护的扰动。这类装置能监控的一些常规质量偏差如表10.6所示。

表10.6　“Arc Guard”识别的质量问题

问　题	问　题
电流高或低	焊丝用完
电压高或低	焊丝伸出长度过长/焊丝伸出长度过短
保护气故障	中间焊缝功率损失
电弧稳定性差	焊接电源故障
送丝打滑	

当用于自动焊接系统时，可对每单位增量长度焊缝作出合格/不合格的评价，并在此基础上计算每条焊缝合格长度所占的百分比。此外，评价的结果可用来启动关闭焊接单元的控制动作或者诸如清理焊枪的操作。

监控器提供了串行输出端口（RS232或422），数据能从许多焊接单元中下载到中央计算机，在那儿作对比，进行生产统计和总体性能的评价。

提供在线指示与预设参数的偏差的监控系统，有时也称为可编程误差监控器[255]，这些监控器的复杂程度差异很大，可能会从微处理器控制的设备到简易的低成本电子报警器。

3）统计过程控制。由于可以将大量的数据传输和下载到个人计算机上，所以能够使用统计过程控制技术[227, 228]。统计过程控制被定义为[229]：

用统计技术监控和分析过程状况，准确地测定过程性能，并执行所需要的预防或校正动作。

文献[230]显示概率定律可用来确定质量特征变异的可预测极限，所观察的数据超出这些极限应被视作潜在质量问题的指示。在任何焊接过程中，内在的过程特征和环境条件导致了观察参数固有的分散。这种固有的分散被称为“普通原因”变异。在很多情况下，如果过程操作正常并且收集了充分数据，这些值将落在类似于图10.8所示的正态概率分布曲线内。如果观测到的参数落到所建分布的外面，那么可认为是反常的或者“特殊原因”的过程扰动造成的。通过监视正常操作中的焊接过程，计算样本平均值（X_m），每个样本范围（R）和标准差（a），可以设置控制参数的上下极限（UCL和LCL，通常是3σ）。如果后来测量的任何参数落到控制极限之外，就可看做是不正常性能的指示。这些技术理论可用于任意焊接过程，并且已经用在前述的电阻焊和电弧焊监控系统中。

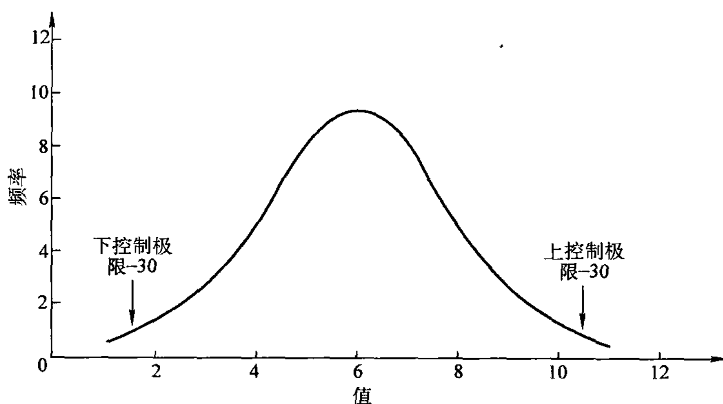


图10.8　正态概率分布

采用电弧监控器，通过采集正常焊接过程的数据，用类似的方式可以建立控制极限并生成控制图。然后通过在图上画出连续的数据点识别出异常条件的影响。图10.9说明了微弱的过程干扰对焊接过程的影响，在这一过程中逐渐减少保护气的流量，不合格焊缝的百分比的值[⊖]反向增加，在小组5超过控制极限。在这个阶段，气体流量已经从初值12Lmin^{-1}减到约7～8Lmin^{-1}，尽管在焊后的目视检查刚刚能辨别出它的影响，但对所需要的应用而言，这样的焊缝仍然是可接受的。到气体流量降至2Lmin^{-1}时（小组9），焊缝是100%不合格，目视检查也无法接受。控制图为不可接受的操作提供了早期警告，并能够在焊接质量到达不可接受的水平之前就向用户警示不良倾向。

⊖ 不合格焊缝的百分比，是由不满足预先设定极限的焊缝段数与总焊缝段数比值的百分数表示。

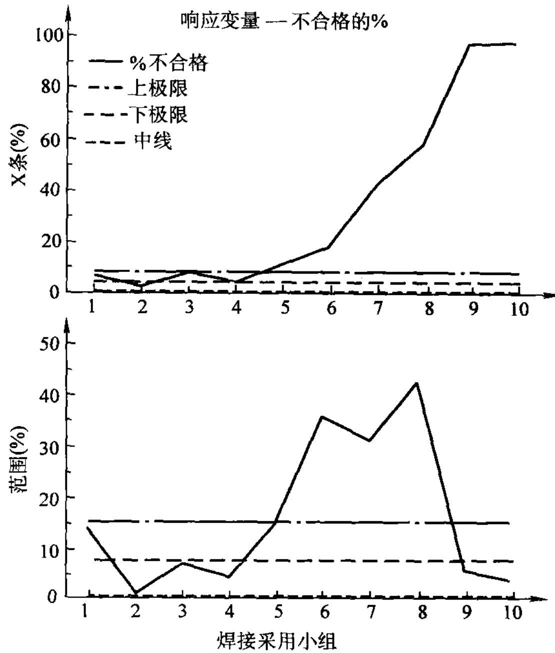


图 10.9 电弧监控输出的控制图显示气体保护不好的情况

4）可见光谱监控。光谱技术在实时监控和焊接质量控制中的应用已有报道[231]。该系统能探测到电弧中化学成分的变化，特别是电弧气氛中保护气不足、电弧气氛中氢的增加，以及药芯焊丝电弧焊过程中药芯成分的变化。尽管在可行性研究中使用的设备昂贵且复杂，但必须正视的是，一旦确定特定的监控需求，简单的带通滤光器件即可用来制作紧凑的焊接监控器。

10.3.2 小结：过程监视

焊接过程中的校正和故障检修可采用监视技术。这些监视技术涵盖了从简单仪表到能收集和报告大量焊接装置的状态、趋势和生产统计的基于计算机的在线系统。

无论使用的监控系统类型如何，确保采用正确的仪器类型、测量技术并记录测量过程是很重要的。

基于计算机的监视器提供了在线质量保证的功能，这一功能在降低成本、保证焊接操作的可靠性及减少焊后测试等方面都作出重大的贡献[232, 233]。例如，据报道，有一个制造商通过使用在线数据记录系统减少了 50% 的焊后破坏性测试，每年可节省 90000 美元以上[234]。监视器所获数据也可用于优化焊接过程和预防性维护程序。重要的是许多质量体系标准确认将使用连续监控作为重要的控制技术，例如 BS5750[235] 指出：要求使用“连续监视和/或遵守备有文档的工艺规

程”以确保满足指定的需求。重要的是，尽管这些系统可能相对复杂，并能提供过程偏差的明显指示，但仍然需人工干预来校正焊接过程。

10.4　自动化控制技术

通过使用合适的监控系统和机械化焊接，就有可能在没有人工干预的情况下自动地校正焊接过程偏差。所有涉及到的方法都取决于控制系统及方法，并且在讨论常规应用前，理解应用于工业过程中的控制的基本规律是很重要的。

10.4.1　控制系统

制造系统可用图10.10表示。系统的输入是被焊材料和焊接材料，通过焊接过程转化成最终的焊缝，这类控制系统可分成两类[236]：

开环控制系统：输出量不直接影响系统控制，如图10.11a所示。

闭环控制系统：由输出量导出的一些信号直接用于控制系统，如图10.11b所示。

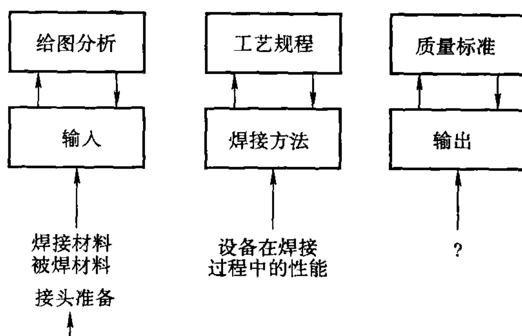


图10.10　在焊接制造中应用的常规控制技术

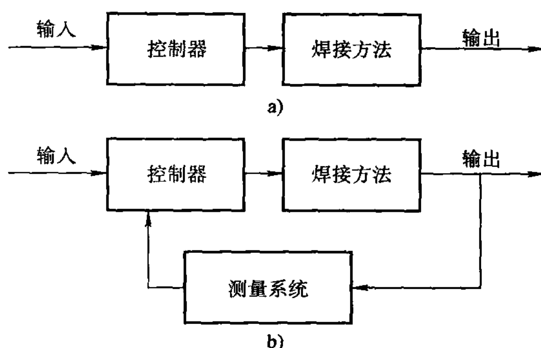


图10.11　开环控制系统与闭环控制系统

a）开环控制系统　b）闭环控制系统

按预定的工艺规程，焊接接头实际上是一个开环系统。尽管可以采取各种措施来确保维持预定的参数（例如通过设备校正和监控），但作为焊后检查结果的校正行为不是直接的，并且有时是在制造过程完全结束之后发生的。

闭环系统也被称为反馈系统，因为从输出中导出的信号被反馈，并和参考参数相比较。该比较结果是偏差信号，被反馈给控制器，并以这种方法减少偏差。偏差校正系统或者控制器可以是一个人工操作者。例如在短路过渡的熔化极气体保护焊过程中，焊工经常根据电弧声音通过调整送丝速度、电压或者电感来调节焊接过程。在这种情况下，声音是短路频率的一种指示。在更先进的控制系统中，人工操作者由自动化控制代替，它连续地监视输出量，通过将适当的输出参数与预设参考相比较而得到偏差信号，并通过偏差信号不断地校正系统。在自动闭环控制系统中，偏差校正的速率很关键，因为低的响应速率或者过校正都会导致系统运行不稳定。设计合适的控制策略将对系统性能有着重大的影响。

闭环控制的几个不同形式已用到了焊接应用中。这些可称为：直接控制、非直接控制、自适应控制和学习控制。

直接控制意味着用来调节的参数与测量和反馈的参数一致。例如在焊接电源中，如第 3 章中所描述的，电流是通过监控其输出水平来调节的。不幸的是，在很多焊接情况下，不可能使用直接控制，而必须采用基于二次变量测量的非直接控制。下面将描述几个非直接控制系统，但典型的例子是：用于焊接熔深控制的焊缝温度测量与反馈，和用于电阻定位焊焊点几何形状控制的动态电阻测量与反馈。

“自适应控制”一词常用来描述焊接过程控制中最新的进展。但从严格意义上讲，自适应控制仅限于能应对性能动态变化的系统[237]。自适应系统应该具有根据操作过程中不可预知的变化作出自我调整的能力。在文献［238］中指出，焊接应用中的“自适应控制”术语并不意味着常规控制理论的定义，而是以更具描述性的方法解释对焊接方法和过程对焊接条件变化适应性的需求。

学习控制系统是逐渐通过经验提高其性能的系统，最通常的例子就是人类操作者，但基于计算机的学习系统也已经得到开发并应用于焊接生产。

10.4.2 闭环控制的基本要求

对于焊接中成功的闭环控制，必须获得恰当的反馈信号。这些反馈信号必须以某种方式与待调节的参数相关。必须产生合适的误差信号，并且系统能响应所需的校正。反馈信号可通过监测常规的焊接参数或者采用能提供间接数据的传感器或变换器来获得。输出和控制参数之间的关系可由数学模型、算法或方程来定义。控制参数校正的方式由控制策略来定，其控制效果极大地依赖于系统的响应速率。电子调节电源的引入使得在该领域能取得重大的进步。

自动过程控制在焊接中的主要应用是线划跟随/焊缝跟踪、弧长控制、熔透控制和在线质量控制。这些将在下面讨论。

1. 线划跟随

焊接中已有许多线划跟随和焊缝跟踪系统，可根据所用的传感器系统进行分类。

1）触觉传感器。最简单的接触传感器是弹簧加载的导轮，用以保持焊接头和所跟随的接头之间的确定关系，如图10.12所示。这种低成本系统非常有效地用在简单的机械化牵引小车上，可减少安装时间和提高一致性。复杂一些的触觉传感器，利用一个探针将位移转化成电信号，并反馈给自动焊接小车，通过调整焊枪的位置来跟随焊缝。

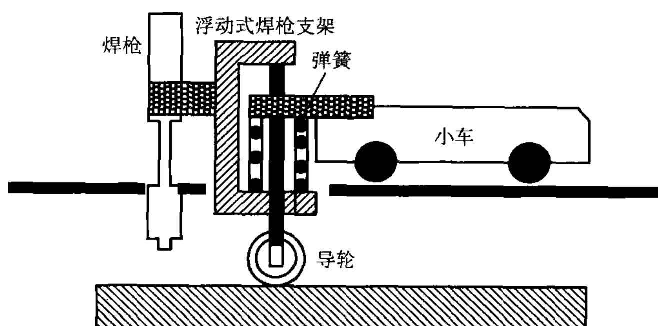


图10.12　接触式焊枪高度控制

这些系统从本质上说很简单，如果板材的表面条件恶劣或者在多道焊情况中探针需要跟踪凸起的焊缝熔敷时将导致跟踪误差。通过使用特殊的探针端头（例如用于应对点固焊点）可减小这些恶劣条件的影响。

2）焊前传感/接头定位。在全自动焊接和机器人焊接装置中，使用接触或非接触传感器可以在焊接前确定焊缝的位置。一种常用的技术是利用熔化极气体保护焊电极的末端作为接触探针[239]。在机器人应用中，焊枪移动到接头附近的示教点（见图10.13），然后焊接头从示教点沿着Z轴移动直到接触到工件（用高电压、低电流的直流信号来探测接触），沿X轴方向缓慢地稍微离开接触点并回扫以确认接触点。然后焊枪沿X轴移动直到接触到另一块板，也执行一次短距离和低速的移动和回扫以确认第二个接触点。从测量的数据中计算出接头的交叉点，然后焊枪移动到合适的起始点。

类似系统已用于造船中含有便携机器人的焊接装置中。这个例子中，机器人采用接触搜索路径来检查它在焊接中的位置，并调整程序的基准点来校正误差[240]。

采用光学传感器的焊前传感已经用在大型铝结构的熔化极气体保护焊制造

中[241]。其中由于工件的复杂性，可能出现很大的装配容差。在这种情况下，在焊前采用激光视觉系统（见下面的“结构光/视觉传感器”）来跟踪和纠正焊接路径。

3）电弧传感器。电弧传感技术是利用在焊枪端部来回摆动期间一个或多个电弧电气参数的变化来定位接头的位置。这些技术通常用于角焊缝、大截面V型对接焊和窄隙焊。如果焊接头或者电弧电极端横向摆动经过焊缝，在到达接头边缘时，电弧长度或者电极到工件的距离将会减小（图10.14）。在采用恒流电源的钨极惰性气体保护焊时，在焊缝外边缘处电压就会减小，而在采用恒压电源的熔化极气体保护焊或埋弧焊时电流将增加。焊枪移动的限制可由参数的变化来控制，这样摆动的中心总是保持在接头的轴线上。在钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊中，电弧可以通过电磁摆动来提供电弧焊缝跟踪所要求的接头扫描[242]。

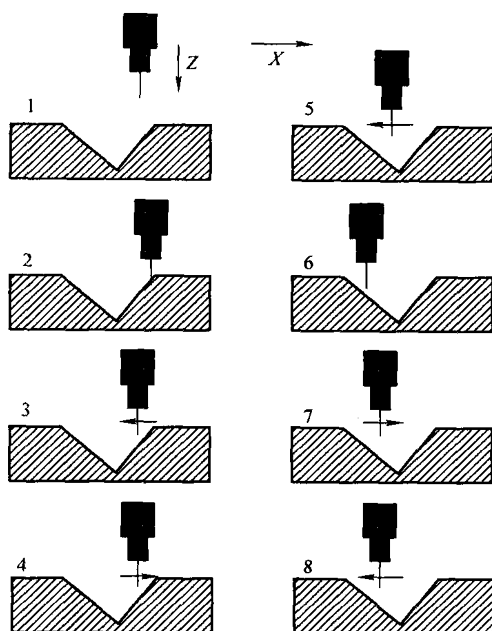
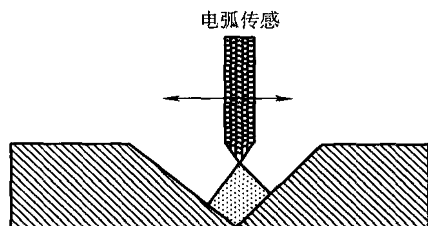


图10.13　接触传感焊缝定位



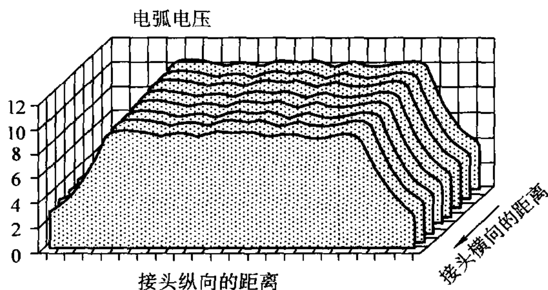


图10.14　电弧传感

现在，这些电弧跟踪系统常见于焊接机器人中，也已用在管道环缝的钨极惰性气体保护焊中。

4）感应传感器。感应接近传感器可用来跟踪角焊缝，而涡流传感器能用来跟踪横截面为矩形的对接接头。感应传感器相当紧凑、坚固并且不受电弧可视光辐射的影响，但在工件或者夹具中的磁场可能产生假信号。它们已经成功地用于机器人熔化极气体保护焊方法焊接的对接、搭接和角接焊缝的焊缝

跟踪。

5）光电传感器。最简单的光电焊缝跟踪传感器，使用清晰界定接头线的光发射器和接收器。在有些情况下，需要使用平行焊缝放置的带子以确保获得清晰的信号。这些系统成本相当低，但要求有一条清晰界定的接头线，并且测量过程可能受弧光影响。文献［244］中描述了一个包含采用红外发射/接收组合件在焊枪前面扫描接头的系统，这提高了接头线的分辨率而不需要预置带子。另一种系统用常规的灯、红外二极管或者激光二极管照明焊枪前方30mm的接头区；用光电二极管阵列或者由256个二极管组成的线阵变换器测量反射光[245]。

6）结构光/视觉传感器。在大多数结构光/视觉系统中，采用一个小型CCD㊀视频摄像机采集横向投射到焊缝上的线性结构光的图像，其原理如图10.15所示。结构光可由常规的灯和投射透镜获得，但更常用的是低功率氦氖激光器或者二极管激光器。激光条纹可用光学技术（柱面镜）得到或者用摆动的反射镜使激光横向扫过焊缝。在视频图像中将重现接头的轮廓，这一信息数字化后，由实际图像和参考图像间的差异产生误差信号，用于控制系统校正焊枪的横向位置。为了避免电弧光的干扰，采用了与光源波长对应的带通滤光片。在大多数情况下，光源采用的是红光或红外光谱部分，因为这部分的电弧辐射水平较低。这类系统已在机器人焊接和自动化焊接中成功地用以跟踪搭接、外角接、内角接、V型坡口和多道焊焊缝。各种应用包括：

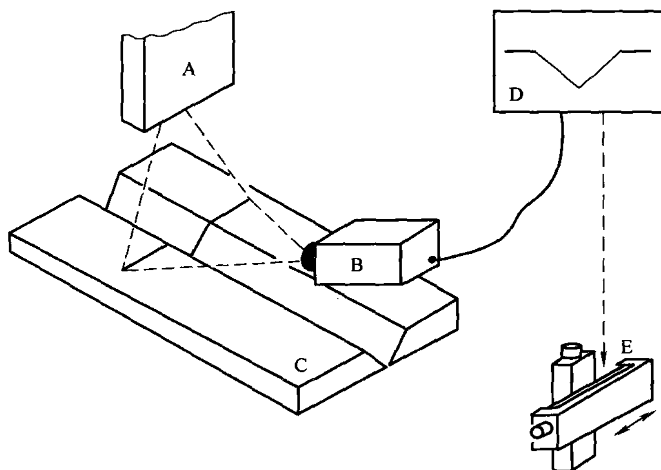


图10.15　激光结构光焊缝跟踪系统的原理

A—激光光源　B—CCD视频摄像机　C—接头　D—图像分析　E—焊枪定位系统

㊀ 由于它们的结构紧凑而且坚固，CCD或CMOS摄像机更适合于这些应用。

① 带有复杂三维焊缝的汽车悬架钢冲压部件。采用短路过渡熔化极气体保护焊焊接，焊缝位置保持在0.5mm的精度。

② 航天应用中用钨极惰性气体保护焊焊接0.4mm厚的因康镍合金管件（跟踪精度0.1mm）。

③ 用药芯焊丝电弧焊焊接厚壁钢的多道焊接头。

最初的激光/视觉系统相当庞大并且昂贵，但近期的发展已使得这些跟踪系统做得更紧凑而且提高了响应速度。这一技术也可用作焊前检查和焊接变量的自适应控制[246]，如以下“焊缝几何形状预测”中所讨论的那样。

7）直接视觉传感器。焊接区域也可以不采用结构光，直接用视频摄像机来观察。用单个摄像机很难获得与接头轮廓有关的三维信息，但是可使用与焊枪同轴的光学观察系统，确定焊缝的相对位置，如图10.16所示[247]。通过分析在视频图像窗口中接头线的位置，可确定焊枪位置的横向误差。尽管采用这类方法时，焊枪总成相当复杂，但其优势在于电极有效地阻挡了电弧辐射，并且通过在视频图像中测量焊缝宽度，还有可能获得一个附加的反馈信号用来控制焊接速度。该系统最初是为钨极惰性气体保护焊而研发的，但据文献[248]报告，在原理上该技术也可用于熔化极气体保护焊方法。

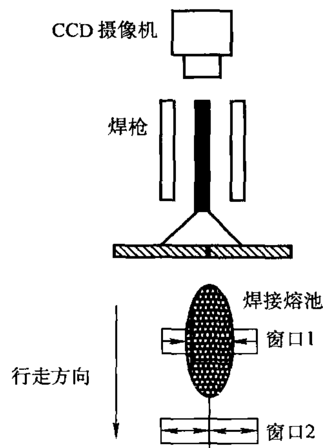


图10.16 用于钨极惰性气体保护焊的同轴视频监视系统

8）超声传感器。超声传感器可用于探测母材板中未熔合的接头线。使用这类技术的首要问题是需要超声变换器与被焊板材的紧密接触。但近期研究[249]，在常规金属板表面条件下，采用伪浸入式探针探测接头未熔合线可达到0.2mm的精度。

9）化学成分传感器。跟踪焊缝的一种新方法是用电弧的部分光谱成分来探测特定化学种类的存在[250]。电弧辐射由一个光纤装置收集并被传送到在线分析设备，在那里监视由特定元素产生的光信号水平。在异种金属接头中，该信号指示了电弧的横向位置，通过与参考值相比，产生用于校正焊枪位置的误差信号。在成分均匀的接头中，可采用可熔插入件的形式，引入示踪元素。

2. 电弧长度控制

电弧长度控制对确保一致的热输入、恒定的熔化速率、稳定的工艺性能和足够的气体保护是重要的。电弧长度可由良好的接头准备、仔细的焊枪定位或者在本章中描述的接触传感器来保持。此外还有几种闭环系统已经用于电弧长度控制。

1）电压测量。在钨极惰性气体保护焊接过程中，通常使用恒流电源。在给定电流下，电弧电压能够清晰地反应电弧的长度。这些系统直接测量电弧电压，然后比较测量值和参考值，并根据二者的差值控制焊枪高度来校正误差㊀。电弧电压取决于电流、保护气、工件化学成分、焊接极性和电极尖角，因此系统参考值必须根据所用的特定条件设置。当系统用于脉冲钨极惰性气体保护焊或者脉冲等离子弧焊时，为了避免不稳定，电压的测量必须与脉冲波形同步。电弧电压传感可能是电弧长度控制最普通的系统，不需要额外的传感器，而且该技术可以使用传统的模拟电子或者数字微处理器控制。

2）声音测量。通过在电弧中施加一振动频率并测量声音水平可实现在钨极惰性气体保护焊中电弧长度的控制。如图10.17[251]所示，可发现声压随电弧长度增加而增加。这可用来监视电弧长度的变化并据此产生弧长校正信号。该技术实际应用中的一个问题是周边噪声的干扰，这种影响可通过将所用的频率设定到正常能听得见的范围之外来使其最小化。问题也可能随着现代电源中高频开关技术的应用而增多，但可用滤波技术来克服这一点。

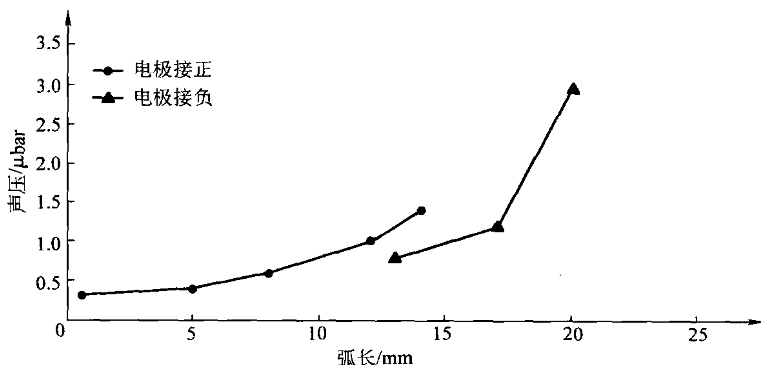


图10.17　钨极惰性气体保护焊中弧长对声压的影响[251]

$1\text{bar}=10^5\text{Pa}$

3）光电传感器。由红外发射和接收装置组成的简易光电传感器在非焊接应用中被用作接近传感器。这些装置也可以用于焊枪高度传感，它们成本很低，耐用性良好，并且不受瞬间电弧电压不稳定的影响。

4）激光测距仪。在机器人和自动化应用中，激光测距仪可以用作焊枪高度传感器。这些装置采用低功率的固态激光器，通过使用三角测量原理可以非常精确地测量距离。由于他们成本很高，所以一般并不单纯用于高度传感，通常还结

㊀ 通过电压的弧长控制经常称为AVC或弧压控制。

合了焊缝定位和跟踪功能。

5）光及光谱辐射传感器。在固定电流时，钨极惰性气体保护焊中总的弧光强度一般随弧长的增加而线性增加，这就为其作为反馈信号提供了可能。当然，也有文献[252]发现：在很短的电弧长度下，由于电弧中金属离子浓度的增加，总弧光强度也会升高。通过有选择地监测电弧发射光谱可获得改善的信号，特别是在强氩线波长为7504Å、7514Å、8006Å 和 8015Å 时（$1Å = 10^{-10}m$）。该技术可避免与电弧长度无关的电弧电压波动问题，并可使用放在离开电弧一定安全距离的相对简单的传感器。

3. 熔透控制

熔透控制技术主要用于单面焊但要求接头完全熔透的对接焊缝。这些技术也可以用于关键的根部焊缝，例如管道环缝的打底焊。

1）背面传感。文献［253］表明，从焊接熔池背面发射出的某些特定波长的辐射能量是焊缝面积或宽度的函数。将传感器的带宽限制在 450 ~ 550nm 的范围内，如在可视光谱的绿色部分，可以区分焊接熔池的辐射和母材金属的辐射。实际上，辐射传感器可以是对可见光辐射敏感的光敏二极管或光敏晶体管；加上合适的滤光片和保护罩，传感器可以装在接头的下面（如图 10. 18)。传感器输出的信号被传送到控制单元，在那里与参考值相比较。偏差信号可用来控制一系列的焊接参数，其中最常用的就是在脉冲钨极惰性气体保护焊中的脉冲宽度。在这种情况下，脉冲将保持在高水平直到熔透完成从而反馈信号达到参考值。这时，电流将降到基值水平并维持一个固定的时间，焊枪沿着焊缝前进。脉冲持续时间根据接头的条件发生变化，如果有热量积累的趋势就减少脉冲时间，如果板材的厚度增加就增加脉冲时间。

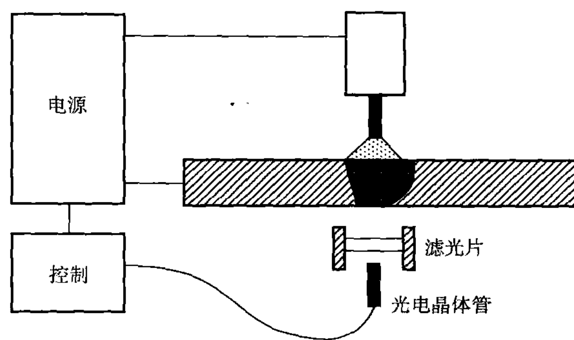


图 10. 18　背面熔透控制系统的原理

对于工业应用，辐射可由光纤光缆传输到光电传感器。该技术简单可靠，虽然需要接近焊缝的背面，但如果使用光纤，则往往很容易实现。其应用包括小直

径管子的对接焊，也包括不锈钢储罐外壳环缝的焊接。

该技术在脉冲熔滴过渡的熔化极气体保护焊中的应用也得到研究，对于钢板厚度不大于3mm的对接焊，在焊缝根部间隙变动最大达2.5mm、焊接速度和板材厚度渐变的情况下，仍能维持焊缝宽度的控制[254,255]。也可以用一个CCD摄像机来代替光敏传感器，基于这种方法的控制系统已经研制成功[256]。在穿孔型等离子弧焊接中，可用一个光敏传感器或者视频摄像机监视从小孔后部穿出的等离子流来控制工艺过程。

2）正面光传感。随着在钨极惰性气体保护焊过程中探测熔池振荡的系统的发展，熔池正面的熔透监控近来日渐可行[257]。该技术涉及使用短时大电流脉冲（如100A持续1~2ms）来激励熔池，使熔池产生振动。振动频率通过光学传感器接收熔池表面反射光的波动来观测。研究发现，未熔透的焊缝会比熔透的焊缝产生更高的振动频率，而且差别非常显著。通过分析频率，可以探测到由于熔透现象导致的频率降低，并反馈给控制机构。该系统的配置和所依据的机理如图10.19所示。

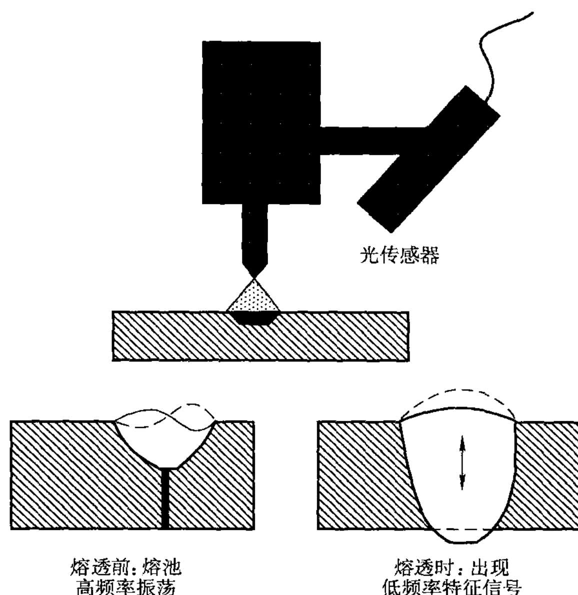


图10.19　正面熔透控制系统的原理

3）电压振荡。使用电弧电压的测量来探测焊接熔池的强迫振荡也得到成功的验证[258]。但是该技术因为电气噪声而变得复杂，使得其应用受到相应的限制。

4）超声熔透控制。用于熔透控制的超声传感技术不如其相应的焊缝跟踪系

统发展得好，但基于类似原理的控制系统已有实例。用一个单一的传感器复合焊缝跟踪和熔透控制是很有吸引力的，但系统的成本和复杂性很可能较高。

5）熔池凹陷。在钨极惰性气体保护焊过程中形成焊缝完全熔透时，焊缝趋于下陷，表面形成凹陷。如果焊枪高度一定，则相应增加的电压可看作熔透的指示[259]。此外，如果使用AVC（弧压控制）系统，焊枪的位移可作为反馈信号。该技术作为一个连续闭环控制系统的可行性已经在平焊位置的焊接中得到证实，但在其他焊接位置的应用可能受到限制。

6）正面视觉。采用直接观测焊接熔池的形状连同熔池轮廓与熔透的合适关系模型可用来预测完全熔透的发生。尽管系统看起来是可行的，但需要复杂的图像分析功能和能精确预测熔池轮廓/熔透关系的数学模型。

7）射线成像控制。在采用熔渣保护的焊接过程中，例如SAW（埋弧焊）和ESW（电渣焊），射线成像监控已被用于工艺性能的分析。高质量的实时射线成像和图像处理技术已经推动了在线熔透和质量控制系统的发展[260]。X射线源被放置在待焊板材的上面，图像增强器和摄像机被放置在工件的下面，用计算机控制系统来分析图像，并为控制系统提供恰当的校正，保证维持恒定的熔深。

这种方法显然很复杂而且成本高昂，而且仅有可能用在没有其他可用技术的特殊应用中，并且由质量约束来说明总体成本的合理性。

4. 在线质量控制

上述焊缝跟踪、弧长控制和熔透控制系统的目的是补偿接头坡口准备、装配和材料特性的小范围波动。它们的应用将焊接性能维持在预定的水平，减少劣质焊缝的可能性。悲观地看，即使焊缝在正确的位置，焊缝仍可能含有冶金缺陷，如气孔和裂纹。理想的看法是，控制系统应该实时地监视接头质量并采取校正措施以确保达到要求的标准。

虽然已有一些实现自动质量控制的措施，但这个领域仍然有相当多的研究课题。

1）焊缝形状预测。焊后的焊缝形状可能本身就是质量判别标准或者形状与二次质量考虑因素之间有明显的关系（例如，凸起的焊缝加强高可能导致应力集中和由此产生的裂纹，或者高的深宽比可能导致凝固裂纹）。如果能够获得焊缝变量和几何形状之间关系的足够精确的模型，就可以在线调整工艺参数来生产出所要求的几何形状。最近，合适的数学模型的研究已经取得进展，但它们在焊接过程控制中的应用仍处在研究阶段。

2）热像传感。焊接熔池的远程热成像是一种实时估计接头温度轮廓的实用方法[261, 262]，它能控制熔透、焊缝跟踪和焊缝的冶金特征。使用专家系统，所观察到的温度测量可关联到缺陷的可能性及接头可能的力学性能。传感过程可由一条光纤和远程的热成像系统或热线扫描仪来完成。该系统并不比激光条纹传感器

昂贵，但提供了更全面控制的可能性。

3）混合控制系统。把来自几种简易传感器的信号结合起来，经常有可能获得更好的工艺性能指示，并确保更有效的控制。例如，当焊枪位移传感器与电弧电压和电流测量相结合时，可以用于辨别送丝打滑和焊枪高度变化。结合计算机控制，这些混合系统的应用日益增加，应该能提高获得真正在线质量控制的能力。

10.5　本章小结

焊接控制的可选范围，涵盖了从基于焊接工艺规程的传统开环人工系统到复杂的闭环自动化技术。改进了的监测技术和大范围的传感器，可用于在手工电弧焊和自动化焊接的过程中监测工艺性能，并且能够获得更稳定的焊接质量。

应用恰当的控制方法，能够提高生产率从而降低总体成本。所有监控技术的应用，特别是计算机监控系统的应用，正在日益显示其经济性和提高质量的效果。

然而复杂的自适应控制系统不应该用来补偿接头坡口准备和工件质量上可避免的不足。这一点经常被证明是昂贵而无效的。

在本章所描述的自动化闭环系统中，有些是最简单的但也往往是最有效的。

第11章　焊接自动化及机器人技术

11.1　引言

很多传统的焊接方法都是劳动密集型的，如图11.1所示，对焊接成本的分析表明，总成本的70%~80%是由劳动力因素产生的。焊接自动化是一种通过使用机械系统来代替部分或全部手工劳动，从而减少焊接加工总体成本的一种手段。然而自动化的引入可能有着比其最初对劳动力成本的影响更为深远的意义。特别是，它对安全与健康、产品质量、供应的灵活性等因素的影响尤为值得关注。

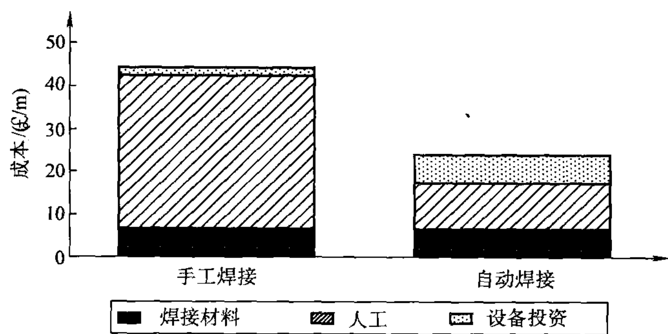


图11.1　20mm厚钢板对接焊缝的成本对比（水平V形坡口对接，水平位置，60°V形熔化极气体保护焊）

11.1.1　安全与健康

大多数焊接方法都有潜在的危险：焊接时会产生微粒烟尘、有毒气体、噪声和一系列的电磁辐射，这些辐射包括从电弧焊接发出的紫外线辐射到电子束焊接中的X射线。这些危害已众所周知，而且也建立了一些处理这些危害的规范。然而，这些必须用来保护焊工和协作者的措施会增加成本，并可能使焊接操作复杂化，或者涉及使用笨重的防护服。此外，一些人工操作的失误也会使焊工及其周围的人处于不必要的危险之中。

除了这些与焊接工艺本身有关的危害外，还有一些与焊接操作有关的危险，

例如在密闭空间、水下、放射性环境中焊接。自动化提供了一种使得操作者远离与焊接方法本身和操作导致的相关危害的方法，此外它还为改进焊接环境的控制提供了广阔的前景。

11.1.2　产品质量

手工焊接技术通常难以实现可重复的产品质量，特别是涉及先进材料或复杂的接头结构时。提高焊接自动化水平能显著地提高焊接的一致性，提高生产能力，降低检验和废品的成本。

11.1.3　供应的灵活性

用自动化系统比劳动密集型操作更容易满足产量的需求。在提高产量之前需要长期的培训或对焊工资质有要求时，上述说法显得尤为正确。

11.2　自动化方式

焊接自动化涵盖了从简单的变位机到完全集成的系统。为清楚起见，各种自动化方式将按以下标题进行讨论：

1）简单的机械化。
2）专用及特殊用途的自动化。
3）机器人焊接。
4）模块自动化。
5）可编程控制。
6）远程控制及自动化系统。

11.3　简单的机械化

最常见的简单机械化系统可以分为以下两类：牵引小车系统、变位机与操作机。

11.3.1　牵引小车系统

这些系统依靠一个简单的电动拖动装置，可沿着一个平面驱动，或者被放在一个轨道上由一个机架和齿轮驱动。焊接头通常以某种可调夹钳的形式安装在小车上。通常认为，对于埋弧焊，直接摩擦驱动的系统就可以满足要求，但是对于熔化极气体保护焊（GMAW）和药芯焊丝的焊接来说，装在轨道上由齿轮驱动的系统才是首选的，因为它们不易于滑动。

轨道通常为直线形式并用于直线焊缝，但是也可做成圆形的轨道用于管道焊接和做成整个圆环轨道用于圆形切割和焊接。

用户也可以采用这些装置加上一系列的各种标准辅件来满足某一特定的应用。这些装置包括进行熔化极气体保护焊全位置焊接的焊枪摆动装置，带动辅助设备（如送丝机构）的拖车，电动机驱动的十字滑架和接触式焊缝跟随装置。

11.3.2 牵引小车驱动装置的应用

该类设备的便携性使得这种单元形式尤其适合于大型结构制造过程中的焊接应用，例如海洋工程结构、建筑结构和储罐等。这种典型应用的一个很好的例子是英国核燃料有限公司（BNFL）在谢拉费尔德（Sellafield）的一家核回收公司[263]在制造奥氏体不锈钢衬套包层中，使用牵引小车和摆动机构完成了约5000m垂直和水平位置对接焊缝，接头形式为304L不锈钢的方对接焊缝，在预制于单元混凝土中的扁平碳钢或不锈钢角钢上焊接（如图11.2所示），采用实心焊丝和带协同控制的焊接电源实现脉冲过渡的熔化极气体保护焊。在这个实例中，制造商能够在手工焊接所无法达到的时间尺度内实现了一致的高质量接头焊接。

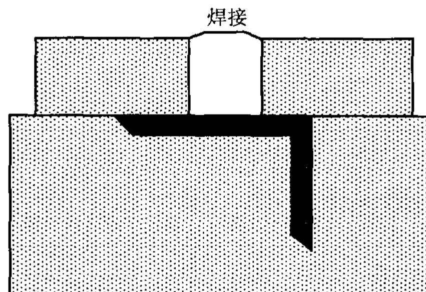


图 11.2 用于不锈钢包层操作的焊接接头形式

在一个制造24.4m直径的起重机筒体的事例中也采用了类似的系统[264]，用来焊接35mm厚BS 4360 50D材料的总长96m的对接焊缝。据估计，与采用手工电弧焊的立焊方法相比，采用牵引小车驱动装置节省了约3万英镑。

这些基于牵引小车的系统适应性很强，只需稍加修改就可满足很大范围的应用要求。图11.3显示了一个使用标准牵引小车系统的新颖例子。该例中，要在大型碳钢板中插入不锈钢螺母，并间隔性地焊接，接头是有防漏指标要求的角焊缝，然而却缺乏熟练的熔化极气体保护焊焊工。使用小直径不锈钢填充焊丝和氦气/氩气/二氧化碳作保护气的熔化极气体保护焊可以获得合格的焊缝轮廓，但是

可达性和高焊接速度的要求使得采用手工操作难以获得一致的焊接质量。因此采用了图 11.3 所示的牵引小车和轨道系统：用熔化极气体保护焊焊枪代替了通常的氧-燃气切割系统，由一个绝缘销钉插入螺母中实现装配和定位功能（绝缘销钉同时还起到保护螺纹避免受到飞溅破坏的作用）。这个机械化系统的总成本不到2000 美元，已经生产了大量的高质量接头，平均焊接时间为20s。这个例子表明：尽管这些系统通常最适合一些具有简单几何形状的长焊缝，但是它们也可以应用于一些非常小的接头。这一系统可简单地配合电极熔化的焊接方法（熔化极气体保护焊，药芯焊丝气体保护焊，埋弧焊）共同应用，但也有一些特殊的系统可以用于钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊接。这种自动化仍然需要焊工的持续监控，但是避免了焊工直接靠近热源，减少了烟尘暴露，也降低了疲劳因素。

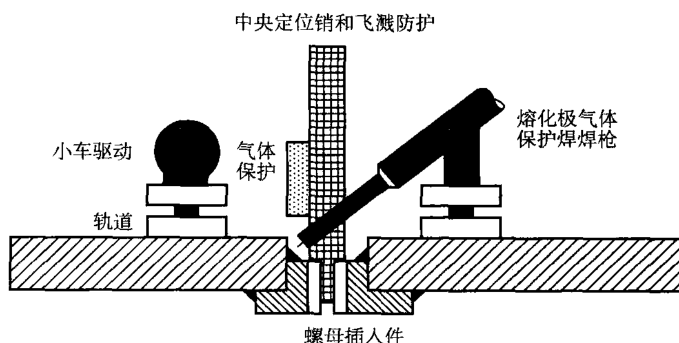


图 11.3　防护螺母焊接系统

11.3.3　固定焊接站

简易的旋转变位机和焊接行走机构可以用在一个固定的焊接头甚至手持焊枪的下方，以移动相对较小的工件。采用简单的夹具，这种自动化就很容易适应较小批量的生产。这尤其适合环形焊接路径，但若安装线性滑台也同样适合直线焊缝。这些低成本装置也包括焊接电源开关同步装置和焊缝弧坑填充装置。对大一些的工件来说，可以使用立柱悬臂变位机、电动横梁、滚轮架和回转台[265]。和牵引小车系统一样，这些装置最适合简单几何形状的焊缝和电极熔化的焊接方法。它们的适用范围较广，仅受待焊工件的尺寸和重量的限制。这类系统的最大优点是能保证在平焊位置实施焊接，从而能达到更高的溶敷速率和高质量。这些优势在重型构件上最为重要，即使最初在变位设备上的投入较高，最终它也能节省大量的成本。这些系统的典型配置如图 11.4 所示。

立柱悬臂、滚轮架和重型回转台最常见的应用场合就是压力容器和发电设备

制造中的纵缝和环缝。一些非常大的单元也用于潜艇壳体分段焊接和发电系统环缝接头焊接。

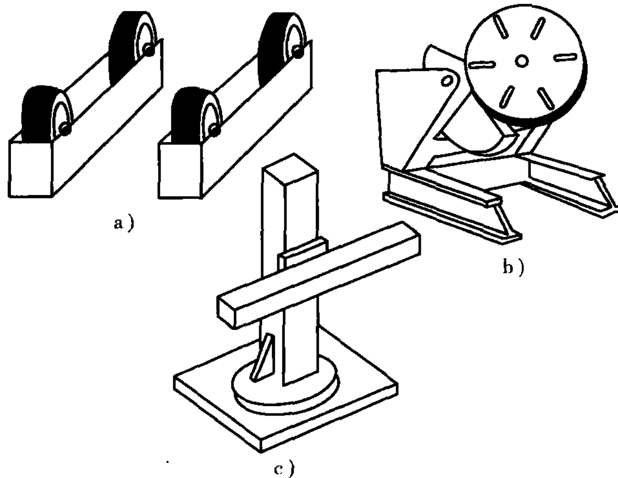


图 11.4 重型变位设备（不按比例）
a）滚轮架 b）倾斜回转台 c）立柱和悬臂

11.4 专用及特殊用途的自动化装备

11.4.1 专用自动化装备

专用自动化装备是指专门为特定应用而设计的特殊焊接系统，当工件和接头发生变化时，专用设备很可能无法适应。这类自动化通常仅适用于长设计周期的大批量生产。

传统上，专用自动化主要用在汽车部件的生产上，比如车轮和排气系统，并可配有广泛的焊接方法，包括电阻点焊、钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊等。

在多站自动化系统中，焊接头通常只是一个单工作站，其中还包括准备待焊工件及实施焊完后的操作，在这种情况下通常还包含一种带有单一装卸工件功能的“转盘式”设计。在小批量生产和产品短生命周期条件下，当焊接环境特别恶劣或者成品质量非常重要时，也会采用专用自动化装备。在核工业放射材料的加工和关键构件的制造中，都会有上述应用的例子。该类设备在核工业关键构件制造中应用的一个典型例子[266]，就是在 Heysham Ⅱ 和 Torness（UK）电站工程中，采用钨极惰性气体保护焊焊接先进气冷反应堆的立管接头，采用了配有复杂

焊接电源⊖和控制系统的昂贵的专用自动化设备，无缺陷和可重复性的严格要求促使使用这类昂贵设备。

因为需要针对特殊工件来设计专用系统，因此专用焊接自动化设备往往成本高昂。如今，许多专用自动化设备已被模块化自动化设备和焊接机器人代替。

11.4.2　特殊用途的自动化系统

特殊用途自动化是为具有相似接头形式但尺寸在一定范围内变化的工件而开发的。这样的例子有：简易纵缝焊接机、环缝焊接系统和熔化极气体保护焊断续焊接机。

1. 纵缝焊接机

通过钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊和熔化极气体保护焊等方法，焊接金属板材来制造简单的圆筒或者连续条形带，是非常常见的。为了满足这种应用，已有能在待焊区域附近自动夹持工件而且焊接头可以沿着焊缝移动的标准自动化设备。这种设备能适应一定范围内的材料厚度和工件尺寸，但它专用于纵向焊缝的焊接。

2. 环缝焊接系统

管道和圆筒制造应用中的环缝焊接的需求通过一系列的环缝焊接系统得到满足。这些系统包括管-管焊接机、管-管板焊接机和管内焊机。这些通常是便携式系统，一般安装在待焊的管道上方或内部，围绕待焊接头旋转大多采用钨极气体保护焊完成焊接过程。较大的设备可能是类似以前所描述的装在环形轨道上的牵引小车系统，而小的系统则采用马蹄形夹钳的设计。送丝和弧长控制有可能内置于焊接头中，更复杂的系统会随着焊枪在焊缝上的移动而控制焊接参数变化。

这些系统经常用于焊接电站建设中的锅炉管道接头及管-管板焊接。与手工焊接相比，自动化焊接系统可以大幅度提高生产率，例如，在BNFL核燃料后处理工厂，采用环缝焊接技术制造了60000多个不锈钢管道对接焊缝[267, 268]。采用环缝焊接系统以及改进的管道准备和清洗技术，提高了每条焊缝的首次通过率（从50%～60%到87%～90%），并且每条焊缝减少了一半以上的人工时间；由于采用了预先放置的插入式焊接材料[269]，可采用简单的方形边缘坡口准备和接头对准，无须送丝系统，并可采用单道焊接工艺。和这个例子一样，在很多情况下，为了适合于具体的应用条件而采用的自动化技术，还带来了很多额外的好处。

⊖ 所用的焊接电源是一种脉冲钨极惰性气体保护焊晶体管电源，具有可编程的接触起弧和弧长控制功能。焊接头还装有视觉系统，用于焊接区域的远程监控。

3. 熔化极气体保护焊断续焊接机

熔化极气体保护焊断续焊接机是一种新颖的装置。其中熔化极气体保护焊焊枪装在一个小的电动滑台上，这些作为一个整体安装在一个焊接头内，焊接头能够自动定位在焊缝内，并利用机械方法固定焊枪高度和角度。焊缝长度和速度由操作者预设（该机构能调节的最大值为150mm），焊接过程通过一个简单的按钮来起动。这个机构对于实现大小一致的角焊缝是非常理想的，并且机构设计得非常易于使用，操作者只需在垂直或水平方向上把持住就行了。

11.5 机器人焊接

工业用机器人不是人形焊接装置㊀，而由英国机器人协会定义为：

工业用机器人是可重复编程的装置，为执行特定的制造任务，该装置被设计成通过不同的可编程动作操纵或传送部件、工具及特殊的制造器械。

就焊接机器人而言，"工具或特殊的制造器械"㊁由焊接头、送丝系统及跟踪装置组成。现在可用于机器人焊接的工艺包括熔化极气体保护焊、药芯焊丝电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、等离子弧焊、电阻点焊、激光焊和NVEB（非真空电子束）焊接。

标准的焊接机器人系统由以下几部分组成：

1）一个机械手臂或操纵系统。

2）一套焊接部件。

3）一套控制系统。

11.5.1 机械手臂或操纵系统

操纵系统的一系列常见结构已经演化，如图11.5所示。通用焊接机器人的最常见结构是关节式手臂，通常有六个或更多的运动轴。关节式手臂的优势在于它的灵活性高而且能够到达通常难以到达的区域（它和人类手臂有相似的外形，这可能并不是巧合）。

SCARA（Selective Compliance Assembly Robot Arm）机器人通常用于装配操

㊀ 机器人（Robot）一词第一次出现在卡雷尔·凯培克（Karel Capek）于1920年出版的情节剧"罗萨姆的万能机器人"中。计算机控制的人形机器的形象或者说将机器人人形化，最早出现在阿西莫夫（Asimov）的科幻小说之中，更近期的出现在亚当斯（Adams）的小说[270]《马文妄想机器人》中。尽管工业机器人也可被赋予人类特征的属性，但它们实际上是简单可编程的、通常是由计算机控制的执行器，特别是，它们并不具备有意识的操作。不幸的是这些科幻形象已经深深地烙在我们对工业机器人的印象中，不知不觉地抬高了对工业机器人的期望，并影响对它们用途的判断。

㊁ 经常被称为"末端执行器"。

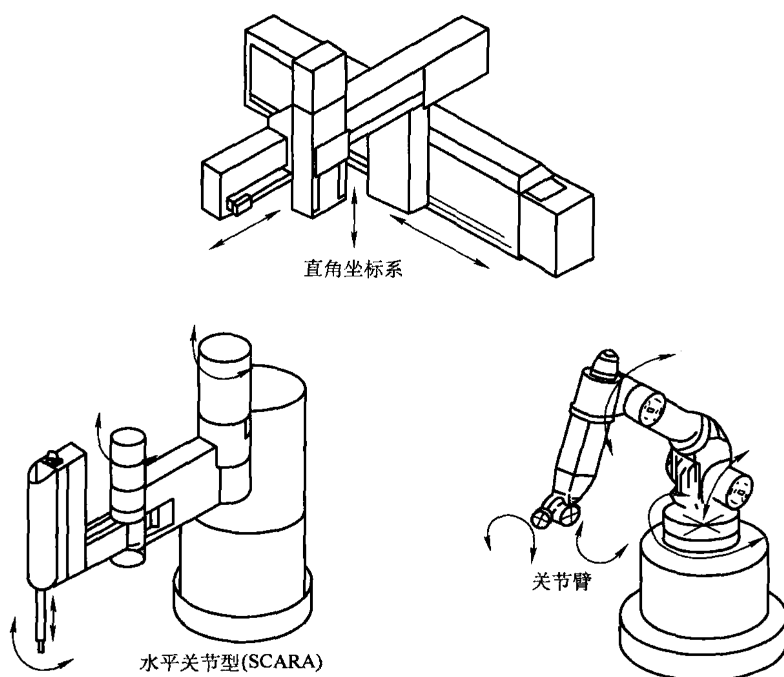


图 11.5　典型的焊接机器人结构

作，并只有有限的定位能力，然而它被一些制造商用作在小批量生产中简单的、易于示教的4或5轴机器的基础设备。SCARA 机器人系统也曾用来整修磨损的破碎机机锤，由于难以预测的磨损轮廓，所以这不再是一个传统的应用。在这个应用中，磨损的变化量是靠药芯焊丝电弧焊方法较高的工艺裕度及在目测磨损程度的基础上人工选择三个工作程序之一来适应的。其他机器人技术磨损修复是依靠先将磨损件预加工至已知轮廓，然后进行机器人修复。

直角坐标机器人或者龙门架机器人已经用于一些小型的高精度加工和一些需要大型的操作范围的场合。这些标准的结构通过改进可适应一些特殊的用途，例如，为了提高可达性，将关节型机器人倒挂在龙门架上也是很常见的，而通过重新排列轴可以构造特别的机器人结构。虽然后者可能看起来与常规焊接机器人无关，但它仍然具有可重复编程的基本能力来适应不同的用途。普通结构的一个变化就是利用一个线性滑台使整个机器人可以满足沿某个工件或整个焊缝长度方向的运动。在这种类型中，微型便携的和装在轨道上的机器人已经用于焊接大型构件。

机器手臂可由气动、液压或者电力执行机构驱动。液压动力系统适合那些要求高负载能力（大于 35kg）[271] 和有限速度控制的用途，例如可用于电阻点焊。

然而，大多数熔化焊机器人现在都配有直流伺服电动机驱动。步进电动机驱动则用于小型的精密系统，其优势在于输出轴位置的内反馈，缺点是动力不足。

11.5.2 焊接部件

很显然，机器人焊接用的焊接部件取决于所用的焊接方法。但可以确定这些部件的一些重要特征。

1. 电阻焊用的焊接部件

对电阻焊来说，机器人的末端执行器需要携带一个便携式电阻焊枪。保证可重复操作的焊枪坚固性是很重要的，但焊枪也必须是紧凑且可灵活操纵的。不可避免地，这将导致设计中的一些折中，为了能搬得动普通的电阻焊枪头和相当重量的电缆，通常必须使用重型机器人。焊接变压器可从焊枪头部分开，但是这涉及到使用较重的二次电缆和潜在的能源损耗。一些焊枪的设计允许在正常焊接中更换电极装置，以便达到工件的不同部位。

电阻焊是一种“拾放”型的应用：机器人将焊接头置于接合位置上；电极闭合，完成焊接；然后机器人移动焊接头到下个焊接点，重复焊接操作。焊接点之间的移动很快，速度和空间中的绝对位置在移动过程中都不需要精确的控制。由于电阻点焊机器人通常不要求跟踪一条焊缝，因此不需要使用接头定位和跟踪装置。

2. 电弧焊用的焊接部件

对电弧焊接来说，具有遥控功能和输出稳定的焊接电源是必要的。第3章讨论过的电子调节系统和计算机控制，简化了机器人控制器和焊接系统间的接口，也确保了可重复性能的实现。在钨极气体保护焊系统中，机器人只需要把持较轻便的焊枪和电缆，而在熔化极气体保护焊和药芯焊丝电弧焊中，填充焊丝必须被送到焊接头上。为了避免系统故障，送丝必须顺畅，而且希望将送丝机装在机器人手臂的端部，用较短的导丝管将焊丝从送丝机引导到焊枪。有些系统采用紧接在焊枪之后的辅助送丝机构来保证正确的焊丝送进。为确保送丝顺利，通常还采用大容量放线包的低曲率焊丝来提高送丝能力。剪丝和清枪装置也必须提供，而且在一些情况下，还需要使用一些可换的焊枪头。这些装置装在一个转盘里，在机器人周期内可以自动切换。

3. 激光焊用的焊接部件

在激光焊接应用中，激光束沿着机器人手臂传输到工作台，二氧化碳激光通过一系列镜片传输，而Nd：YAG（钕：钇铝石榴石）激光、半导体激光和光纤激光则利用柔韧的光纤光缆传输。

11.5.3　机器人控制系统

机器人控制系统要求：

1）控制焊接头的位置。

2）控制焊接功能。

3）具有与辅助系统的接口。

4）提供操作界面。

5）可供程序存储。

1. 位置控制

通过同时驱动三个或更多的执行器，机器人手臂的末端可以在三维环境中跟随任意路径。然而，为了使末端执行器的位置和速度可控，必须获得和处理与每一个执行器或轴的位置及位置变化速率相关的信息。每个执行器的位置通常是通过一个附加在电动机输出轴上的轴编码器获得的。从这些编码器上获得的信息传送到控制系统中，在那里，这些信息被记录下来，以便复现机器人手臂的位置。早期系统直接在磁带上记录编码器的位置，通过回放，驱动机器人的伺服电动机来复现预先记录的路径。现代的机器人使用微处理控制系统，位置信息被压缩并储存在一些非易失的存储器中。

2. 焊接功能的控制

控制系统必须协调控制机械手臂的运动和所要求焊接的功能。系统必须以一种可控的方式启动和停止焊接操作，并具有设置参数的功能。

3. 与辅助功能的接口

控制系统必须能从很多辅助系统中接收信息。例如，它必须能对开始焊接操作的指令做出响应，能够检查各种条件，譬如焊接夹具上焊接件是否存在，安全门是否闭合。它应该也能发送信号输出到辅助系统中，例如启动工件夹具的运动。大多数机器人控制器都配有大量可编程的输入/输出功能。以太网和其他的现场总线系统（例如 CAN 总线）作为辅助系统和焊接系统界面正越来越流行。这类系统允许通过远程网络进行访问。

4. 操作界面

大多数机器人系统有几个级别的操作界面。其中最简单的就是示教/编程界面和生产/操作界面。编程界面允许示教和检查焊接操作，而生产/操作界面可能允许选择一个特定的已编程作业，但通常只允许启动和停止焊接周期。焊接控制器及其接口的一般结构如图 11.6 所示。

11.5.4　编程/示教

机器人系统的柔性取决于系统能够学习执行某一套焊接操作的能力。对机器

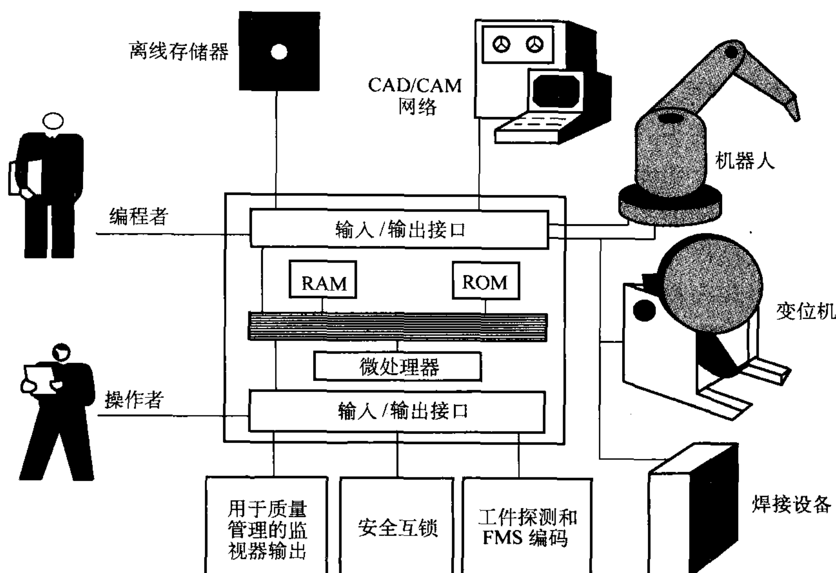


图 11.6 机器人控制器功能

人示教和编程的行为经常被轻视为相当简单和快速的操作，但是实际上，创建一个令人满意的焊接程序会花费很可观的时间。示教过程的细节取决于机器人，但通常涉及示教机器人的运动和编辑程序操作指令及增加焊接参数。通常采用两种示教技术：

1）手把手示教或示教再现模式。

2）点到点插值法。

1. 手把手示教

手把手示教或示教再现的编程模式是最早使用的技术之一。通过操作者沿着焊接路径引导机器人运动，并连续地或者周期性地记录焊接头位置。有商品化的SCARA 系统采用了这种方法。机器人设置在示教模式时，利用控制器上的按键将程序定位在一个编号上；然后操作者手动将机器人移动到示教的第一点，按下机械臂后部的按钮记录下这个点；用类似的方式示教焊接路径上一系列点；焊接起始位置利用另一个按钮来区别；由控制器上的另一个按键终止程序，并存在存储器里；然后利用控制器上的键盘和可见显示器的 VDU 显示屏编辑焊接参数和输入/输出（I/O）程序；之后整个程序可以在计算机控制下以“TRACE”（没有实际焊接）模式运行作最后检查；然后在生产过程中执行整个程序的“PLAY”模式则由一个与输入/输出端口相连的简单开关或者按钮启动。

这一过程很容易学习，编程操作也非常快，但是对于曲线和复杂的形状，需

要记录大量的点。另一种系统使用了连续路径记录技术和安装在焊枪末端的装置来维持焊枪到工件的正确距离。这些系统的一个内在问题就是机械间隙。在“TEACH”（示教）模式中记录轴位置的编码器没有考虑由于引导焊枪在机械手臂上所引起的任何变形。即使小型 SCARA 系统的刚度趋于将这一问题最小化，这也可能在再现中导致不精确。

2. 带插值的点到点方式

这种系统在熔焊机器人中是最常见的。在控制器中选择程序标识号及“TEACH”模式，然后通过操作示教盒上的按钮或操纵杆，手动控制机器人，由正常的执行器驱动机器人通过工作空间中的路径。在所选择的点上，通过按下在示教盒上的按钮来记录位置。示教点间的运动方式、速度和焊接操作与否的选择也是使用示教盒上的按钮。运动方式的选择主要是“线性（LINEAR）、圆弧（CIRCULAR）、摆动（WEAVE）”，计算机将会根据编程点内插出一条合适的路径。示教程序会在编程结束后储存，再进一步的指令、焊接参数、控制时序可以再次编辑。这种方式提高了精度，并提供了由软件生成摆动模式等功能，但是编程过程需要花费比示教再现方式更多的时间，而且需要更加注意避免意外碰撞。

11.5.5 程序存储

示教程序都存储在控制器中的非易失性存储器里（例如，带后备电池的RAM），可以将一系列的程序汇集到一个批文件来完成一项特别的工作，还可以在库文件中存储常用的焊接参数以便在主程序中调用[⊖]。为了保险起见，或者为了释放控制存储器中的存储空间，程序、作业和存储文件可转存到硬盘或者磁带中。

11.5.6 实际因素

为了成功应用机器人焊接，必须考虑一些实际问题，包括安全性、清理焊枪、装夹和定位、加工流程、工件公差和接头设计。

1. 安全性

尽管机器人系统将操作人员从焊接的临近区域中解脱出来，并且减少了烟尘、弧光、噪声和辐射的危害，但由于机器人手臂可以高速运动并伴随着相当大的力，所以机器人单元活动时，任何时候都要禁止操作者和相关人员进入机器人工作空间。这使得使用机械防护和安全互锁装置非常必要。此外，任何自动化系

⊖ 例如：库文件可包含起弧指令、设置电流、设置电压和焊接速度或减小电流、减小电压及关闭焊接电源。

统都比人工操作具有更快的工作周期，一个班次中产生的烟尘总量也比非自动化设备要高很多，因此，需要提供足够的排烟装置。

2. 焊枪清理

在自动化的熔化极气体保护焊接中，如果焊枪喷嘴的末端积聚了过多的飞溅，气体防护就会失效。这个问题可以通过正确选择焊接设备和焊材消耗品达到最小化。但是在机器人焊接程序增加定期的清洁焊枪操作也是有必要的，已有的焊枪清理器能实现这一目的。

3. 装夹和定位

夹具系统必须精确地定位焊接工件，而且装卸简单，不会对机器人手臂运动造成障碍。将工件安装在可编程变位机上可以扩展机器人的能力，通过变位机与机器人的协调运动可以实现复杂的接头轮廓线的焊接。在很多情况下，把机器人倒挂在龙门架上也是很有利的。

4. 工作流程

若要实现机器人的完全能力，平滑地进出机器人系统的工件流就显得非常重要。这就至少意味着要仔细规划工件，并且可能还涉及自动化装料和卸料系统的投资。

5. 工件公差

大多数熔焊机器人的位置重复性在0.1mm的数量级。标准焊接机器人会期望焊缝就在编程时原始工件所在的那一位置，同时间隙和错边等条件也完全一样。偏离这些条件可能导致焊接缺陷和夹具损坏。因此，建立装配公差和保证工件尺寸符合限定的范围是很重要的。有些情况下，这涉及提高对工件变化率的控制，并可能需要在冲压、裁切或机加工设备上增大投资。

6. 接头设计

缜密的接头设计可以减少对工件公差的敏感度，例如薄板的没有衬垫的对接接头和角接头可用搭接接头代替，以减少间隙可能造成的问题，并能为横向移动提供更大的公差级别。虽然机器人能实现相当复杂的三维路径，但这不应该成为采用复杂接头轮廓的动机。因为这不仅使达到所要求的质量更困难，还会增加加工周期。通常简单的接头形式总是最好的。在机器人的焊接设计时也必须考虑可达性。有时一次装夹可能无法焊完一个工件，从而不得不卸下工件并重新定位。通过重新设计适合机器人的焊缝位置通常可以避免这种问题。一些这类应该考虑的因素如图11.7所示。

11.5.7 应用

1. 电阻点焊

电阻点焊机器人形成了焊接应用中最大的单一分支。这种机器人大部分用在

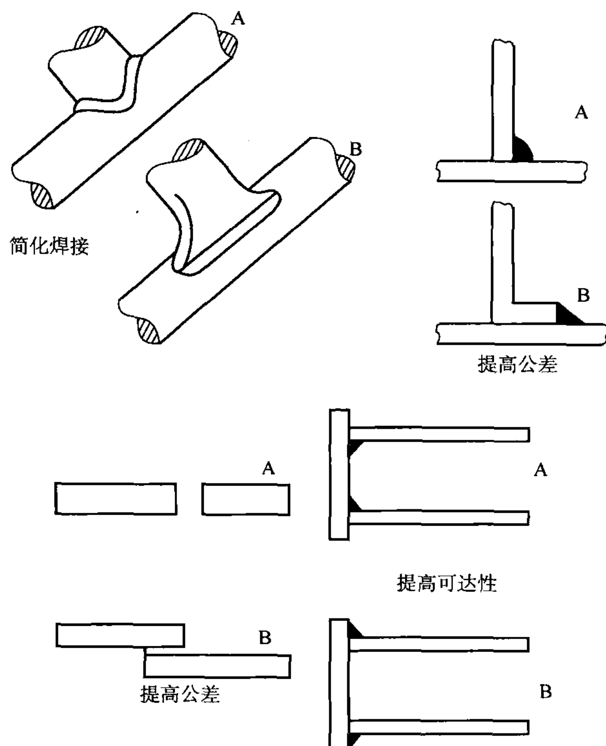


图 11.7 改变接头设计以适合自动化
每个例子中 A 为原始设计，B 为修改后的设计

汽车工业，许多机器人能在同一汽车壳体上同时工作。关节型机器人最为常用，但是在大型工件上例如铁路客车的侧板上[272]也有应用龙门架系统的例子。

机器人自动化方法适合大批量生产，通过重新编程也可适应模型变化的应用。机器人也可以在恶劣环境中代替人工难以进行的操作。尽管需要足够的力量和刚度来搬动焊接头和减少由于快速加速和冲击负载所造成的振动，但是位置的高精度和线速度的精确控制通常并不是必不可少的。

2. 接缝焊接电弧焊方法

使用熔化极气体保护焊、药芯焊丝电弧焊、钨极气体保护焊和等离子弧焊等方法的连续焊缝焊接，已经应用到从汽车排气管到航天飞机部件的宽广范围中，如表 11.1 所示[273~277]。其中最主要的应用是使用熔化极气体保护焊方法焊接薄钢板冲压件。

表 11.1 机器人应用

应　用	材　料	焊接方法	机　器　人	原　因	参考文献
装饰大门	热轧软钢	熔化极气体保护焊	5 轴 关节机械臂	成本和生产率	270
液压起重部件	BS 4360 43A 钢 10～12mm	熔化极气体 保护焊	6 轴 关节机械臂	降低成本	270
医院病床	方形截面钢管	熔化极气体 保护焊	5 轴 关节机械臂	降低成本， 提高质量	270
汽车仪表板	铝	点焊	模块化直角 坐标机器人	提高产量	270
核电锅炉板	钢	熔化极气体 保护焊	龙门悬挂关 节机器人	质量	270
家用锅炉	钢	熔化极气体 保护焊	双机械臂	缺乏技工	270
军用储存系统	3mm 厚特氟龙 XK-350	点焊	直角坐标	经济	270
汽车底盘	压制钢	熔化极气体 保护焊	16 关节机械臂	提高产量和 质量	271
汽车排气系统	钢	熔化极气体 保护焊	关节臂操作 机加上 FMS	增加产量和 提高质量	272
涡轮叶片	不锈钢	填丝脉冲钨 极气体保护焊	6 轴 关节机械臂	质量及 计算机 集成加工	273
航天飞机发动机	镍基，钴基， 钛合金和不锈钢	脉冲钨极气 体保护焊	多种形式	质量	274
汽车车身	低碳钢	点焊	6 轴 关节机械臂	产量和质量	275
发动机支架	低碳钢	激光焊	6 轴 关节机械臂	产量和质量	275

接缝焊接应用需要在焊接操作中准确定位焊枪位置，并精确控制焊接速度。编程时间一般较长，工件的公差和装夹也很重要。由于这些原因，对机器人自动

化的投入期望有合理的批量。

3. 机器人高能束焊接

机器人的激光束和电子束焊接应用尚处于初级发展阶段，目前正在进行机器人系统用于真空室外非真空电子束焊接的尝试。但是激光焊接的工业应用正在取得进展，例如用于 Fiat Tipo 发动机支架的焊接[278]，为激光焊接特别设计的机器人已经面世。这些激光焊接的机械手臂中带有反射镜或者光纤光束传输系统。

11.6　模块自动化

由于完全专用自动化设备的成本和限制日益明显，所以也尝试构造能够适应一定范围应用的低成本柔性系统，这导致了模块化自动化系统的发展。

模块化系统包含一套通用的机械部件，可以组装成适合应用的任何结构。这些模块由支撑梁、滑板、小车、枢轴、线性和旋转驱动、焊枪保持架和控制系统组成。这种方式的优势是系统设计快速、简易和低成本。

采用这种方法，可以非常快速地开发出一套焊接自动化系统，并省却昂贵的设计研究。万一发生损坏和故障，标准部件很容易更换，安装的总成本也保持在最低。这种系统适用于大多数普通的电弧焊接方法，特别适合熔化极气体保护焊、钨极气体保护焊和等离子弧焊。位置控制、操作时序及与焊接设备的接口，由一个简易的电子逻辑系统提供。系统的能力可以通过使用标准工业可编程序控制器来拓展。

11.7　可编程控制

用于机器人焊接的控制系统也可应用特殊用途的、专用的和模块化的系统来提高系统的柔性。例如，在环缝钨极气体保护焊接设备中就采用了这种方法，可以为特定的工件编写并存储复杂的程序。在这种情况下，计算机控制系统通常与焊接电源结合或作为焊接电源与焊接头的接口。

对于专用自动化和模块自动化更一般的应用，开发了柔性计算机控制系统。这些系统含有以下部分：

1）定位控制。

2）焊接工艺控制。

3）单元管理。

定位控制系统控制着几个旋转或线性轴的位置和速度，可实现三维的轨迹，能够控制焊接头和工件的位置。

焊接工艺控制系统直接控制焊接参数，或者更常见的是经由与智能焊接电源

的接口来控制（见第3章）。

单元管理的活动涉及焊接系统和外部生产环境的通信。该控制应该具有触发装料和卸料系统、提供工作状态和质量信息的能力。

计算机控制和模块化机械设计的结合能提供一种不同于普通机器人方法的选择。

11.8 远控和自动化系统

远控焊接设备用于特别危险的环境，可能采用主-从操纵机或者带有远程监控的完全自动化的系统。

11.8.1 主-从操纵机（MSM）

主-从操纵机使用了多轴变位机，由人工操作机远程定位和控制。这些设备已经在核工业中操作辐射部件，在高压环境中定位工件，或者在高压舱内进行焊接等。

这些系统通常是为满足特定的应用需求而专门建立的。尽管已有一些通用的机械臂⊖，但这些系统一般不是针对焊接应用而设计的，所以重复性、定位精度和负载能力都必须经过仔细的评估。在核工业应用中已经专门研制了这种焊接系统。

11.8.2 全自动远控焊接系统

远程焊接应用中使用全自动的系统可以减少可能出现的人工错误，也能提高可重复性。已研制出的深水高压应用系统[280, 281]，可在深达360m的一个充满富氦气体的干式高压室中实施焊接。焊接头是一个环缝钨极气体保护焊系统，计算机控制的基于逆变的电子焊接电源放置在临近焊接现场（如在海床上）的维护容器中。工艺过程由船上的计算机接口控制，可以把焊接参数下载到焊接系统中。水面上的操作者实施视觉（CCTV）和工艺参数监控，焊接操作自动完成。系统的概略图如图11.8所示。该系统已经在水下110～220m深度，焊接了直径250～900mm不同管道的30多条焊缝，足以证明它的技术性和经济性。

专用自动化系统也在核工业中得到应用[282, 283]。例如焊接铍罐体中的环向焊缝，其中用到了计算机控制系统及晶体管整流的熔化极气体保护焊电源。

⊖ 特殊用途的远控机械臂通常是为水下应用或炸弹探测、处理而专门设计的。

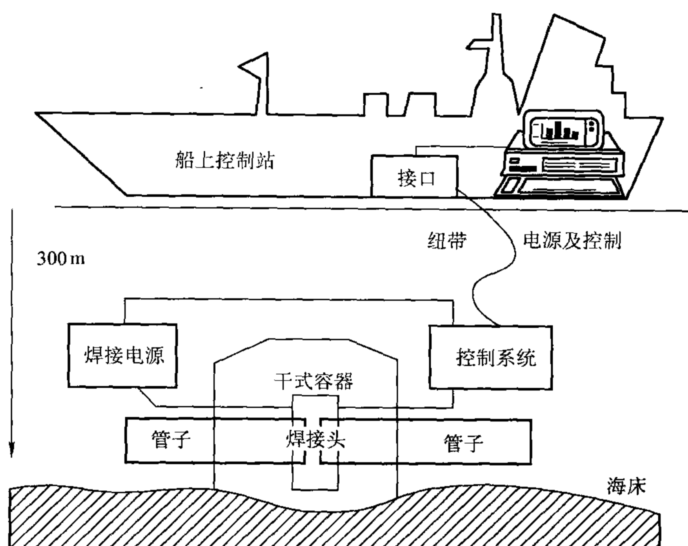


图 11.8 用于管道环缝焊接的自动化高压钨极气体保护焊系统

11.9 焊接自动化的进展

焊接自动化系统的研发和应用已取得了很多进展，尤其在于：

1） 自适应控制。
2） 柔性制造系统。
3） 仿真与离线编程。
4） 集成自动化系统。
5） 快速成形。
6） 磨损修复。

11.9.1 自适应控制

自适应控制（见第 10 章）技术可以在工件尺寸、接头位置和材料特性上将自动化系统的公差提高至通常的水平。然而自适应技术不应该被看做解决这些问题的首要或唯一的方法，重新设计接头或改进工件准备经常在成本上更加有效。当然，自适应控制技术已取得显著的进步，并且具备许多可用备选方案，这些都已在第 10 章中讨论。

11.9.2 柔性制造系统

柔性制造系统（FMS）已用在许多非焊接应用中⊖。该技术通过使用自动规划生产操作来满足工件的可用性和需求，从而逐渐简化要做的工作。一个简单而有效的例子就是 Autotech 柔性焊接系统[284]。该系统中，用传送带把标准的 750mm×1200mm 的随行工作台及待焊工件从装料站运送给机器人。每一个随行工作台上都装有适合特定工件的夹具，可以由侧面五个柱销的特殊排列来识别。当随行工作台进入机器人工作站，接近开关就会读到柱销的位置，并反馈给机器人控制器以选择合适的焊接程序。随行工作台可以以任何顺序送到系统中，生产量也可以随工件的可用性而变化。

这种方法也通过采用 AGV（自动导航车）运送工件和其他工件识别方法得到扩展[285]。根据报告，重型建筑设备制造中使用典型的柔性系统可以节省 28% 的成本。柔性制造系统不仅局限于机器人焊接，也可以应用于配备可编程序控制器的专用化系统和模块化系统。

11.9.3 仿真与离线编程

机器人系统的编程会花费相当可观的时间，这将导致停产。离线编程允许在远程工作站上编写机器人程序，然后几乎瞬间地将程序传输到机器人控制器上。目前已有几种离线编程系统（例如 GRASP、IGRIP 和 ROBCAD），但是这些系统都有以下共性：

1）机器人的图形和运动学模型以库文件的形式储存在计算机里（是大型主机还是个人计算机，这取决于系统）。

2）工件和接头的描述可以装载到程序中，使用选中的机器人来仿真焊接操作。

3）已完成的仿真可以编译成实际的机器人控制语言，并通过数据链路传送到机器人系统。

典型的仿真与离线编程软件包为应用提供快速和逼真的实体模型仿真，能够完全评估和优化目标装置，而不会导致生产停顿。软件包中含有大型的机器人定义库，也能读取工件和夹具的 CAD 文件，这样就可以测试机器人单元的性能，而潜在的问题（如碰撞和可达性限制）可迅速被识别并显示在显示器上。系统也能够生成最终工作单元的 CAD 图，以所用机器人的语言将仿真程序传输到机器人控制系统。

⊖ 柔性制造系统就是能接受通常以随机的顺序出现的不同工件或任务，具有识别工件，并自动适应制造操作的能力，从而生产出所要求的最终结果。

离线编程方法的一个令人感兴趣的例子就是在造船中的应用。典型的系统由龙门架及悬挂在其上的关节型机器人组成。悬挂架降低至工作区后，由一个初始的接头定位程序检查系统的方向并校正基准设置。离线编程软件用来预先编制程序并下载到控制器，所以，一旦工作单元建立其实际的准确位置，就可以焊接规定的焊缝。

丹麦欧登赛造船厂也采用了类似的系统，其中使用了 Hirobo 数控可编程机器人。先在个人计算机上创建程序，然后用磁泡存储器将程序复制到机器人控制器。在此期间机器人只需停产 30s[287]。系统也连接到仿真软件包和造船 CAD 上，将来系统可以实现更有效的离线编程。

11.9.4　集成自动化系统

以上描述的许多典型自动化焊接系统已经发展成集成化系统，其中焊接单元是独立的，可通过数据通信网络连接到其他的制造过程。现在有些制造商供应针对一定应用范围的机器人焊接“单元”，并提供所有必要的服务，包括安全屏和排烟装置。

此外，由计算机控制的专用或者模块化系统也可用来构建基本单元。集成焊接系统也可以采用计算机控制的模块自动化或者专用系统。这类设计已经用在能够适应跨越一定尺寸范围的相似工件的高精度钨极气体保护焊中。为了适应工件尺寸的变化，随行工作台配有无线电频率识别标签（尤里卡标签），该标签可以和控制器通信，根据待焊工件重置系统。在这类装置中为确保焊枪的定位精度，每次运行前都将焊枪在一对交叉光线之间移动，测量电极的位置（这种方法能够保证位置重复精度在 ±0.025mm 之内）。系统的总体管理可由一个专有的 CNC 控制器来完成，该控制器也作为与所串联的准备工作站和结束工作站间的数据通信接口。

这类系统被看做相当于加工中心，因而很容易集成到完全集成的全套生产装备中。显然，这种方法能确保大幅提高质量，提高生产率和供应的灵活性。

11.9.5　快速成形

自动焊可以利用熔敷金属建立金属造型。过去，电渣焊和埋弧焊曾与简单的旋转机构一起用来熔敷大型压力容器外壳。最近，机器人熔化极气体保护焊和钨极气体保护焊已用于制造更复杂的外形。机器人采用离线编程技术将计算机辅助设计（CAD）从类似 AutoCAD 这样的软件包转译成机器人本地程序语言[288]。机器人沿着预定的路径挨个熔敷焊缝金属，生成所需的形状。这种从 CAD 图形直接生成固体金属物体方式的过程非常快，若工艺参数经过优化，最终生成的金属构件不但外观优良，力学性能至少相当于铸造。

11.9.6 磨损修复

有一定范围的磨损修复技术扩展到适于采用机器人焊接方法并在已磨损的工件上修复焊接。这可能包含两种方法：

1）将磨损件预先加工到统一的形状和尺寸。

2）测量磨损轮廓，然后编制机器人路径来熔敷足够的金属，从而恢复原有的轮廓。

其中的第一种方法已经应用到重型推土设备的磨损件上。它的优势在于只要简单的机器人程序，而无需任何自适应控制和轮廓传感。实际上，它仅仅需要预加工操作。

第二种方法用于水轮机转子的修复研究中[289]。在这个例子中，机器人单元集成了计算机控制，表面预先扫描提供了原始轮廓数据，然后转化为预期能重现磨损轮廓的机器人程序。扫描可由触觉传感器（为简单起见）或视觉系统来完成。联合触觉和视觉系统的方法非常有效，可将编程时间减少至大约几十秒钟。

11.10 自动化焊接的评估和判断

许多作者[290-297]研究了对自动化进行系统评估的可能性，主要步骤如图 11.9 所示，也可以罗列如下：

1）定义目标。

2）应用评定。

3）检查可选方案。

4）评估候选方案。

5）评估意义。

11.10.1 定义目标

在目标已经明晰的情况下，不能再过多地强调其重要性：错误定义寻找使用自动化的真正原因可能导致相当的浪费。一般，在引言中概述的目标倾向于经济性、高质量、安全性或者供应柔性的需求，但有些时候，真正的目标可能非常不直接，诸如“为了显示公司已涉及高技术”、“担心竞争”，甚至“因为总经理相信我们需要机器人”也并非罕见。这些管理目标等同于可接受的目标，但是当项目成功实施时，必须考虑它们的含义。

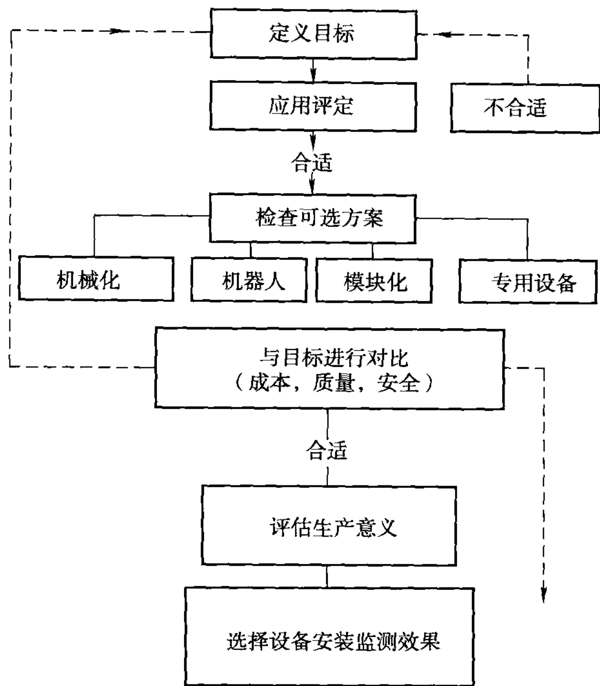


图 11.9　自动化设计网络

11.10.2　应用评定

应用的适用性可按照产品生产全周期评价：接头准备的精度、重新设计的可能性[293]和使用自动化工艺的可能性。

11.10.3　检查可选方案

可选方案已经在上面详细讨论过。在任何应用中，有些方案因不合适而可以早早地排除，但是只要有任何成功的可能，都应该仔细进行评估。评估可能涉及工艺可行性试验和检查相似的生产系统，也应包括经济上的论证。

表 11.2 显示了用熔化极气体保护焊、1.0mm 直径的焊丝焊接钢的对接接头时，在焊接自动化上投入 2 万英镑的效应。左侧一列显示了采用手工熔化极气体保护焊的原始成本，右侧一列显示了自动化在资本费用、利用率（燃弧时间）和焊接质量（废品率）上的估计效益，合计显示了每条焊缝节省的成本和期望提高的生产率。

表 11.2　成本电子表格输出的实例

操作参数	单　位	手　工	自　动　化
熔敷速率	kg/h	3.55	3.55
焊剂或气体的成本	£ /m³ 或£ /kg	3.10	3.10
每 1000 根焊条或每千克焊丝的成本	£	0.77	0.77
每小时劳动力成本（无设备）	£	14.08	14.08
每年小时数	h	1500.00	1500.00
过程燃弧时间利用率	%	28.00	50.00
测量的工件量	%	100.00	100.00
废品率	%	5.00	1.00
总投资	$\times 10^3$£	2.535	22.535
利率	%	8.00	8.00
折旧期限	年	5.00	5.00
每年总成本	$\times 10^3$£	28.788	36.500
每年总熔敷焊缝金属	$\times 10^3$g	1416.45	2635.88
每米的质量	$\times 10^3$g	0.33	0.33
每千克焊缝金属的总成本	£	20.32	13.85
每米的切割成本	£	0.00	0.00
该工艺的每米成本	£	6.68	4.55
该焊缝的累计成本	£	6.68	4.55

11.10.4　评估候选方案——经济论证

要用的经济分析形式经常是公司政策的事，也可能涉及投资回报的评价或者对流动资金的占用，但实际上，大多数的评估是基于简单的成本回收期[⊖]。在结构钢制造中，劳动力成本经常占据焊接总成本的主要部分。因此主要的成本节省是与提高过程的利用率（有效时间与非有效时间的比率）和随之而来的劳动力成本的下降有关的。例如，人工熔化极气体保护焊的操作工人可达到 15% ~ 20% 的利用率，然而，安装牵引小车的系统可达到 30% ~40% 的利用率，全自动化系统可达到 80% ~90% 的利用率。其次，也可以通过提高焊缝尺寸控制和操作技术控制来节省成本。前者可以节省时间，减少消耗材料的成本；而后者可保证一致的质量，降低缺陷水平，降低返修费用。与给定应用的自动化有关的主

⊖ 在日本，近期的调查显示有 66.8% 的公司使用 3 ~5 年的投资回收期作为评判的标准，10% 的公司使用净现值，6.5% 的公司使用内部收益率方法。

要经济因素评价是直截了当的，尤其是使用某个商业化的焊接成本软件包[⊖]的时候。使用 NIL COSTCOMP 软件所做的简单的成本对照例子见表 11.2 和图 11.10。表 11.2 显示了一个对于最普通的焊接结构采用手工和机械焊接方法的对照。仅仅完成 315m 的焊接后，就能收回简易焊接小车的成本。在同样的情况下，一个专用 CNC 单元的高成本也会由利用率和质量的提高（减少报废和返修率）而得以弥补。

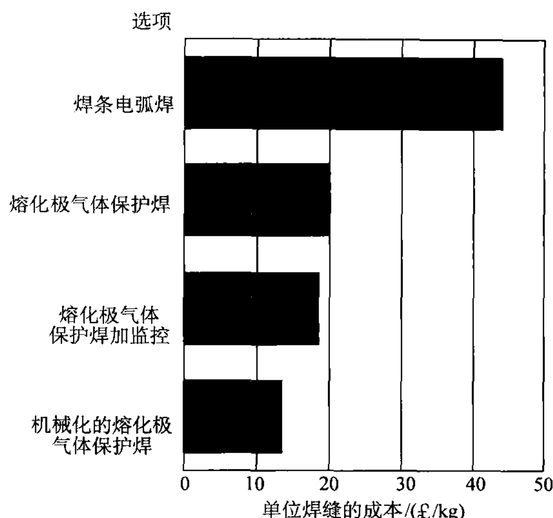


图 11.10 几种降低 6mm 厚钢内角焊缝成本的可供选择方法的成本分析
（数据来自于 COSTCOM 焊接成本软件）

11.10.5 评估意义——期望

关于引进焊接自动化意义的评估经常是不准确的，在引进自动化之前和之后实施的调查[294-297]证实了这一点。在自动化方面投资之前的一些期望和结果评估是值得考虑的。

1. 社会考量

社会意义，尤其是车间的反对常常被认为是引进自动化的障碍。实际上，在一次调查中，31% 的用户在购买自动化系统之前认同这种情况，但只有 2% 确实经历了一些问题。最近的报道表明，大多数工人更愿意用带计算机控制的设备工作。这样做可以在同辈中达到额外的状态。从这些报道中可以清楚地看出，在对

⊖ 例如，英国焊接研究所的“WELDCOST”软件，荷兰焊接研究所的“NIL COSTCOM”软件及任何适当配置的电子表格软件。

与自动化应用相关的决定中，没有给予工人以足够的重视。成功应用的评述表明，自动化的成功实现取决于焊接工程师和操作者的努力与智慧。

2. 生产考量

还可以发现大多数机器人用户低估了所需售后支持的程度、维护要求和把应用完全用于生产所包含的开发成本。遇到的最严重的问题之一经常是工件公差不适当，如果需要更换焊前准备的设备或者需要改变操作程序，可能会牵涉到严重的成本考量。

11.11 本章小结

本章描述的大范围自动化系统能满足以下需求：

1）降低生产成本。

2）提高安全与健康保障。

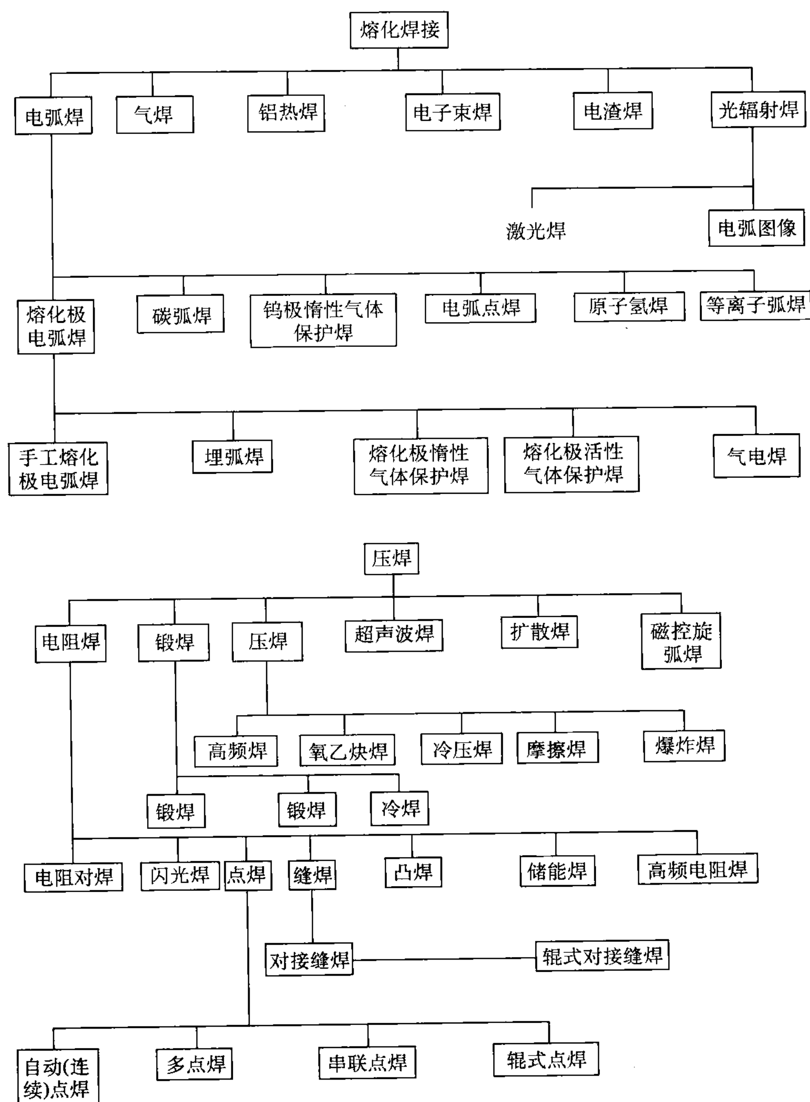
3）一致的产品质量。

4）提高供应的灵活性。

评估从焊接自动化中获得潜在的利益总是值得的。即使在上述所列的选择方案里没有一个是可行的，使用自动化需求分析所获得的信息也可以改进人工焊接操作。

附 录

附录1 焊接方法分类



附录2 手工电弧焊（SMAW）焊条分类

（资料来源：*Welding and Metal Fabrication*）

1. BS 639

该标准通过一系列字母和数字来标识焊条，这些字母和数字表示力学性能、配方类型和应用场合。完整的焊条分类由必要部分和可选部分组成，如下所示。

1）必要部分

E　手工电弧焊焊条

××　抗拉强度范围，最小屈服强度

×　第一个数字，表示伸长率和冲击吸收功

×　第二个数字，表示最小平均冲击吸收功47J的温度

NN　字母，表示涂层类型

2）可选部分

×××　三位数字，表示金属获得率

×　焊接位置

×　电流和电压要求

H　低氢焊条

这个分类相当复杂，详细内容请查阅标准。下面给出典型焊条规格说明。

抗拉强度

标　识	强度/MPa	最小屈服强度/MPa
43	430～550	330
51	510～650	360

第一个数字：伸长率和冲击吸收功

数字	最小伸长率（%）		冲击吸收功28J的冲击试验温度/℃
	E43	E51	
	20	18	非规定
1	20	18	+20
2	22	18	0
3	24	20	-20
4	24	20	-30
5	24	20	-40

第二个数字：韧性

数字	温度/℃
0	非规定
1	+20
2	0
3	-20
4	-30
5	-40
6	-50
7	-60
8	-70

涂层类型

B	碱性	$CaCO_3$，CaF_2
BB	碱性铁粉末	$CaCO_3$，CaF_2 +铁粉
C	纤维素型	Organic
O	氧化型	FeO
R	中涂层钛型	TiO_2
RR	厚涂层钛型	TiO_2，$CaCO_3$
S	其他	

3）焊接位置

1　全位置

2　除向下立焊以外的各种位置

3　平焊和横焊

4　平焊

5　平焊，向下立焊，水平、横焊角焊缝

9　在1~5中所未包括的任何组合

电流和极性

数字	DC	AC
0	根据厂商建议	不适合
1	+或-	50　minimum　OCV
2	-	50　minimum　OCV
3	+	50　minimum　OCV
4	+或-	70　minimum　OCV
5	-	70　minimum　OCV
6	+	70　minimum　OCV
7	+或-	80　minimum　OCV
8	-	80　minimum　OCV
9		80　minimum　OCV

4）典型例子。全位置碱性（铁粉末）低氢型焊条，最小抗拉强度510N·mm^{-2}，最小屈服强度450N·mm^{-2}，-40℃冲击性能优于28J并且在-40~50℃之间高于47J，其分类为

E51 5 5 BB 160 2 8 H

2. 美国焊接学会（AWS）标准 A5.1

AWS 标准相对简单一些，由一个前缀 E 及后面两组数字组成：

E　焊条

× × ×　两或三位数字表示抗拉强度，单位为 10000psi

× ×　两位数字表示涂层类型，具体如下：

E × ×10　纤维素型，直流反接。深熔透，全位置

E × ×11　与 E × ×10 一样，但可用于交流

E × ×12　钛型，交直流两用，平焊，横焊和立焊

E × ×13　钛型，交直流两用，全位置

E × ×14　铁粉末钛型，高速焊

E × ×15　碱性低氢型，直流反接，全位置

E × ×16　碱性低氢型，交直流两用，全位置

E × ×18　与 E × ×16 一样，具有铁粉末以提高获得率

E × ×20　矿物氧化物/硅酸盐，平焊、横焊和立焊

E × ×24　与 E × ×12 一样，但具有铁粉末，平焊、横焊和立焊

E × ×27　与 E × ×20 一样，但具有铁粉末

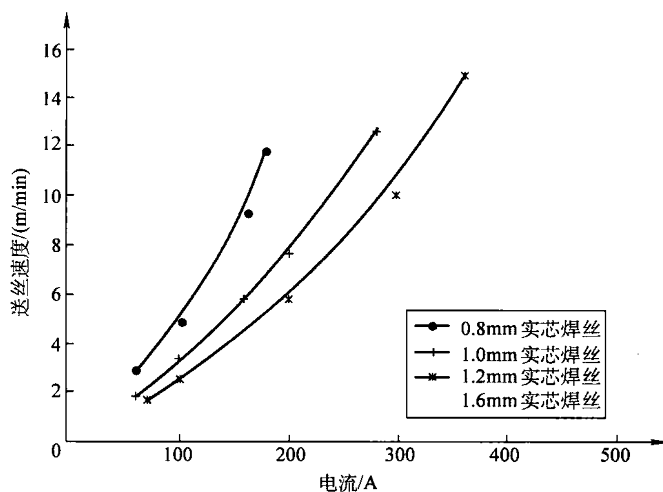
E × ×28　碱性低氢型具有 50% 铁粉末，平焊、横焊和立焊

可能会添加一个后缀（如 A1，B2）来表示低合金钢焊缝金属的化学成分。

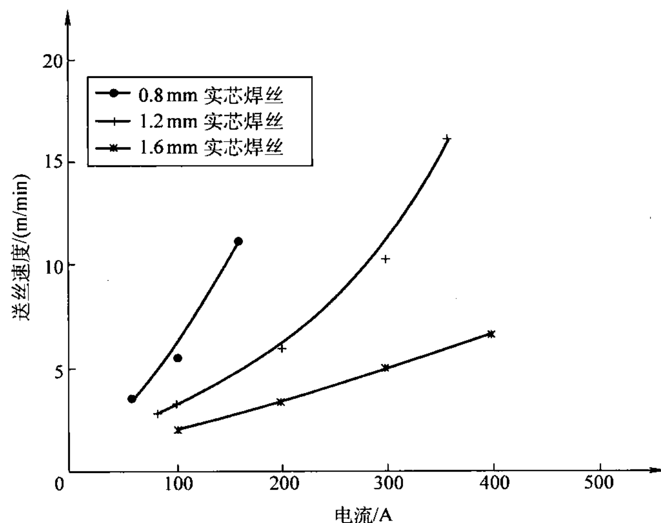
根据 AWS A5.1 分类方法，前面的 E 51 5 5 BB 160 2 8 H 焊条可以表示为 E7018。

附录3　熔化特性

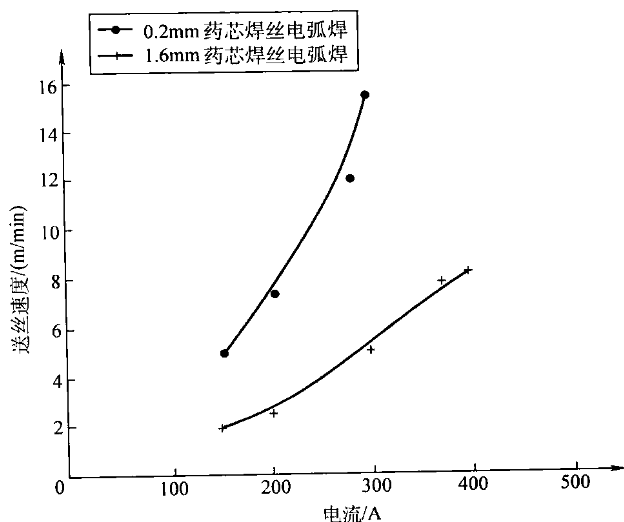
1. 熔化极气体保护焊普通碳钢



2. 熔化极气体保护焊不锈钢

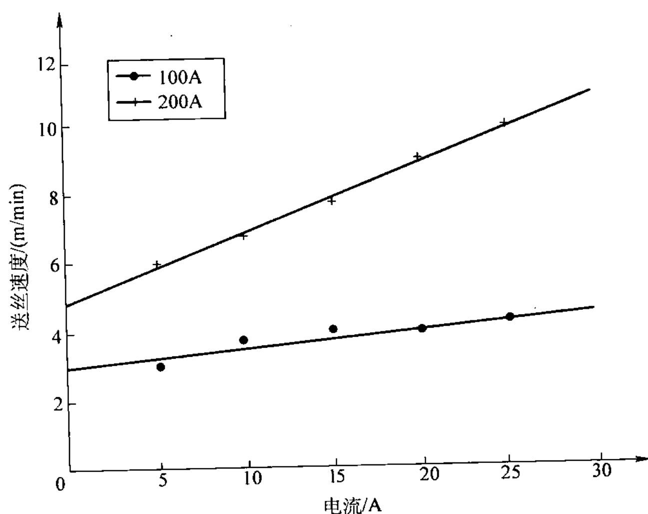


3. 药芯焊丝电弧焊普通碳钢



4. 电极伸出长度的影响

药芯焊丝电弧焊普通碳钢



(1.2mm 药芯焊丝)

附录4　美国、澳大利亚和欧洲药芯焊丝分类系统

1. 美国焊接协会（AWS）铁素体普通碳钢药芯焊丝焊条分类

美国分类系统（AWS Designation A 5.20）是用来描述药芯焊丝焊材最早的、目前仍然是最常用的系统。无疑其普及性归因于它的简单性。分类包括以下内容：

前缀字母‘E’表示焊丝，后面跟着一个数字表示抗拉强度，单位是 ksi（即，7 = 70ksi）；后面跟着一个数字表示焊丝的位置能力（0 表示平焊，1 表示全位置）；一个‘T’表示管状焊丝。

后面一个数字定义焊剂类型和焊丝的操作特性。药芯类型由最后一位数字表示，在标准中具体如下。

命名特性：

T1　钛型气体保护（二氧化碳或混合气体），用于多道焊缝

T2　钛型二氧化碳保护，用于单道焊缝

T3　自保护，直流反接，用于高速焊，薄板

T4　自保护，直流反接，用于高熔敷率焊接

T5　碱性气体保护（二氧化碳或混合气体）

T6　自保护，直流反接，用于高韧性多道焊缝

T7　自保护，直流正接，全位置

T8　自保护，直流正接，全位置，高韧性

T10　自保护，直流正接，高速薄板

T11　自保护，直流正接，喷射过渡

T-G　任何其他类型

AWS A5.20 标准的完整复本可以通过位于澳大利亚的澳大利亚焊接工程研究所（WTIA）获得，也可直接从美国 AWS 获得。

2. 澳大利亚焊材分类

根据澳大利亚分类代码 AS/NZS 2203.1，铁素体钢焊材的分类基于由连字符分开的三组元素标识，如下：

1）第一组。

前缀‘E’表示焊丝，‘T’表示焊丝是管状的，后面跟着一个字母表示焊丝的位置能力：

P = 全位置

D = 平焊和水平垂直角焊缝

S = 仅用于单道焊

2）第二组。

G（气体保护）后面跟着一个字母表示所用的保护气体：

C = 二氧化碳

M = 混合气体（如氩/二氧化碳）

N = 无外部保护

后面跟着一个字母表示所用电流类型：

p = 直流反接

n = 直流正接

a = 交流

3）第三组。

W（表示焊缝金属性能）后面跟着两个数字表示以 MPa 为单位的规定最小抗拉强度的 0.1 倍，后面的一个数字表示冲击能量级。再后面是 A（焊态）或 P（焊后热处理状态）表示热处理状态。后面的一组字母数字代码表示焊缝金属化学成分，代码对应相应的化学成分表。

最后的带有一个数字下标的后缀 H，表示以 ml/100g 为单位的熔敷金属含氢量。

AS2203 代码表示：

焊缝金属的化学成分由标准中的表 2.2 指定。碳锰钢前缀为 CM，碳钼钢前缀为 A，铬钼钢前缀为 B，镍钢前缀为 Ni，锰钼钢前缀为 D，其他合金前缀为 K、G 或 W。

3. 铁素体熔化极气体保护焊焊丝欧洲分类标准

欧洲标准 EN 758 代替了英国标准 BS 7084，内容如下：

前缀‘EN758’指本标准，‘T’表示管状焊丝，后面跟着如下字母数字代码：

X——以 N/mm^2 为单位的焊缝金属的屈服强度的 0.1 倍。

X——焊缝金属的韧性；一个单一数字表示获得 47J 的温度。

X——一个字母数字代码表示合金类型（如，1Ni = 1% Nickel）

X——一个字母表示焊剂类型（R-钛型，P-全位置钛型，B-碱性，M-金属，U 到 Y 自保护）

X——气体类型（M 为混合气体，C 为二氧化碳，N 表示无气体保护）

Hx——氢控制（由后缀表示扩散氢级别）

附录5　用于耐磨堆焊的药芯焊丝

焊材类型	特　点	应　用
普通碳钢	低合金含量，最高硬度200VPN，熔敷金属具有延性和韧性	在堆焊前熔敷铁素体碳钢
珠光体钢	较高的碳/锰含量，硬度250VPN，熔敷金属具有延性和韧性	摩擦（金属与金属）磨损（如履带式汽车上的惰辊）件的堆焊和修复
马氏体-珠光体钢	低合金铁素体钢，最高硬度400VPN，延性和韧性差	摩擦和中等耐磨场合，如粉碎机轧辊
马氏体钢	高合金（C、Mn、Cr、Mo、B），最高硬度800VPN，不可切削，延性低	用于低冲击耐磨场合，如切削刃和挖掘机齿
奥氏体锰-镍	用锰和镍进行合金化的碳钢，熔敷金属硬度低（200VPN），延性好，加工硬化可达500VPN	用于奥氏体锰钢的维修，如破碎机的锤子，好的抗冲击能力，表面耐磨性能尚可
奥氏体不锈钢	一般是308或309型不锈钢，延性和韧性很好，抗冲击和耐蚀能力好，耐磨性低	高冲击载荷很好的缓冲层，好的抗液体腐蚀性能，用于回转破碎机和重锤的堆焊，成本高
碳化铬白口铸铁	高铬-碳白口铸铁，在奥氏体、珠光体或马氏体基体中存在硬碳化物粒子，耐磨性很好，抗冲击能力差，耐蚀能力尚可，硬度取决于基体，350～800VPN	推土设备零件的耐磨堆焊，基体为马氏体时具有最佳的耐磨性，基体为奥氏体时抗冲击、耐腐蚀性最佳，应用灵活
碳化钨白口铸铁	马氏体白口铸铁基体中含碳化钨，很硬（最大850VPN）熔敷金属耐磨，冲击性能差	要求耐磨性好的场合，如沙滑槽和挖泥机挖斗
镍基和钴基合金	韧性、延性、耐腐蚀性好的基体中可能含有碳化物（如碳化钨），成本比铁基的高	高温耐磨和耐腐性强，用于阀和阀座

注：VPN＝维氏角锥硬度。

附录6 等离子穿透孔焊接参数

材料	厚度/mm	电流/A	喷嘴直径/mm	等离子气流量/(L·min^{-1})	保护气流量/(L·min^{-1})	行走速度/(m·min^{-1})
普通碳钢	1.2	130	2.8	4.2	20	0.35
	3.2	270	3.2	2.8	10	0.23
	6.4	300	3.2	2.8	10	0.23
奥氏体	1.2	95	2.8	3.8	20	0.96
	3.2	190	2.8	4.2	20	0.84
不锈钢	6.4	240	3.5	8.5	24	0.35
	12.7	320	3.2	4.7	10	0.18
镍	3.2	200	2.8	4.7	20	0.69
	6.4	250	3.5	7.1	20	0.35
铜	3.2	60	3.2	1.9	10	0.23
耐热镍铬铁合金	3.2	180	2.8	5.7	20	0.69
	6.4	240	3.5	7.1	20	0.35
尼莫尼克合金	1.6	135	2.8	3.5	20	0.92
	3.2	200	2.8	3.8	20	0.76

附录7 钛的等离子穿透孔焊接

厚度 /mm	电流 /A	喷嘴直径 /mm	等离子气流量 /(L·min^{-1})	保护气流量 /(L·min^{-1})	延伸保护气流量 /(L·min^{-1})	行走速度 /(m·min^{-1})
1.6	132	2.8	3.8	20	50	0.92
3.2	185	2.8	3.8	20	50	0.50
4.8	190	2.8	5.6	20	60	0.35
6.4	245	2.4	5.6	20	70	0.23

参考文献

[1] British Standards Institution, 1983 *BS 499: Part 1* (Welding Terms and Symbols, Glossary of welding, brazing and thermal cutting).

[2] American Welding Society, 1989 *Welding Handbook, vol 1, Welding Technology*, 8th edn, Miami, AWS.

[3] International Standards Organisation, ISO 4063, 1998 Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers.

[4] Bay N, 1986 'Cold welding', pts 1–3, *Met Constr*, **18**(6, 8, and 10).

[5] Benn B, 1988 'Friction welding of butt joints for high duty applications', *Weld Met Fabric*, August/September, **56**.

[6] Nicholas E D and Teale R A, 1988 'Friction welding of duplex stainless steel', *Offshore Technology* conf, Houston, TX, 2–5 May 1988.

[7] Nicholas E D, 1982 'A friction welding application in the nuclear power industry', *Weld Inst Res Bull*, **23**(1).

[8] Essa A A and Bahrani A S 1989 'The friction joining of ceramics to metals', Proc int conf on the *Joining of Materials, JOM-4*, Helsingor, Denmark, 19–22 March.

[9] Thomas W M *et al.* 1984 'Feasibility studies into surfacing by friction welding', *TWI Res Rep*, 236, Cambridge: The Welding Institute.

[10] Nicholas D and Watts E, 1990 'Friction welding – a sparkling success', *Weld Inst*, Connect, (8) April.

[11] Bartle P M, 1983 'Diffusion bonding – principles and applications', *Weld Inst Res Bull*, **24**(3).

[12] Johnson K I *et al.* 1979 'MIAB welding, principles of the process', *Met Constr* **11**(11).

[13] Edson D A, 1983 'Application of MIAB welding', Proc Conf *Developments and Innovations for Improved Welding Production*, The Welding Institute, Birmingham, England, 13–15 Sept.

[14] Smith D S, 1989 'Control of quality and cost in fabrication of high integrity pipework systems', Proc *Weldfab Midlands* seminar, 25–26 Oct.

[15] 1989 'Control of welding – welding procedures, basic welding data, No. 11', *Weld Metal Fabricat*, **57**(10).

[16] Salter G R, 1970 'Introduction to arc welding economics', *Metal Construct Br Weld J*, June.

[17] Various authors, 1989 'Improving productivity and the control of quality in welded

fabrication', *Weldfab Midlands* seminar, Birmingham, England, 25–26 October 1989, in *Weld Metal Fabric.*
[18] 1989 'Safety in Welding and Cutting, Welding Data Sheet No 10', *Weld Metal Fabric*, **57**(9).
[19] Puska M J, 1989 'Welding in the 1990s', *Svetsaren*, 2, Esab Group, Sweden.
[20] Tsutsumi S and Ooyama S, Investigations on current usage and future trends of welding materials, IIW Document, XII-1759-03.
[21] Anon, 1990 'What of the 90s', *Weld Distrib News*, January.
[22] Sandham J, 1987 'A comparative study of synergic pulsed MIG and tubular electrode GMAW', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology, 1987.
[23] Weston J, 1985 'Automation and robotisation in welding – the UK scene', Proc conf *Automation and Robotisation in Welding and Allied Processes*, Strasbourg, 2–3 Sept 1985, Oxford, IIW/Pergamon, p 347.
[24] Belforte D A, 1990 'Preview of 1990: the picture begins to clear', *Indust Laser Rev*, January.
[25] Norrish J, 1989 'Arc welding power source designs to meet the needs of industry – Part 1', *Weld Metal Fabric*, **57**(2).
[26] Manz A F, 1969 'Inductance vs slope control for gas metal arc power', *Weld J*, September.
[27] Essers W G, 1979 'New types of power sources for arc welding', *Int Inst Weld Doc*, XII-F-204-79.
[28] Kanervisto M and Pullinen J, 1987 'Solid state techniques improve welding and safety', *Weld Metal Fabric*, June.
[29] Grist J, 1977 'Solid state controls – what solid-state controls can do for welding', *Weld Des Fabric*, August.
[30] Needham J C, 1977 'Transistor power supplies for high performance arc welding', *Weld Inst Res Bull*, March.
[31] Irving R R, 1983 'Power packed transistors arrive in metalworking', *Iron Age*, 15 June.
[32] Rodrigues A, 1981 'Improving the efficiency of the series regulator welding power source', *IEE Seminar*, London, March.
[33] Lowery J, 1978 'A new concept for AC/DC power sources for TIG welding', 4th int conf on *Advances in Welding Processes*, The Welding Institute, May.
[34] Kyselica S, 1987 High frequency reversing arc switch for plasma arc welding of aluminium', *Metal Construct*, **19**(11).
[35] Colens A, 1976 'Electronic welder', *RCA Power Semiconductor, Appl Eng Rep*, Liege, May.
[36] Norrish J, 1991 'Arc welding power sources – design evolution and welding characteristics', *Int Inst Weld Doc*, XII-1215-91.
[37] Judson P and McKeown D, 1982 'Advances in the control of weld metal toughness', Proc 2nd int conf on *Offshore Welded Structures*, Cambridge, The Welding Institute, paper 3.
[38] Dawson G W and Judson P, 1982 Procedural guidelines for the achievement of tough welded joints in structural steels for offshore applications, *Proc 2nd Int TWI Conf 'Offshore Welded Structures'*, Cambridge, The Welding Institute, paper 2, pp. 1–13.
[39] Horsfield A, 1990 'Advances in flux covered manual metal arc electrodes, *Weld Metal Fabric*, **58**(1).

[40] Anon, 1989 'Sahara ReadyPack', Smitweld Reportage, No. 3, September.

[41] Farrar J C M, 1990 'Developments in stainless steel welding consumables', *Weld Metal Fabric*, **58**(1).

[42] Thornton C E, 1988 'Submerged arc welding consumables for high toughness applications', *Weld Metal Fabric*, **56**(7).

[43] Taylor D S and Thornton C E, 1989 *Weld Rev*, **8**(3).

[44] Fraser R *et al.*, 1982 'High deposition rate submerged arc welding for critical applications', *Proc 2nd int conf on Offshore Welded Structures*, Cambridge, The Welding Institute, paper 12.

[45] Troyer W and Mikurak J, 1974 'High deposition submerged arc welding with iron powder joint fill', *Weld J*, **53**(8).

[46] Kohno A and Barlow J A, 1982 'Improved submerged arc productivity with metal powder additions', *Weld Inst. Res Bull*, December.

[47] Paranhos R, 1991 'A numerical method for welding parameter prediction and optimisation', PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.

[48] McKeown D, 1990 'Trends and developments in MIG welding consumables', *Weld Metal Fabric*, **58**(1).

[49] Lesnewich A, 1955 'Electrode activation for inert gas metal arc welding', *Weld J*, **34**(12).

[50] Mistry H R, 1986 'Effects of wire and shielding gas composition on the toughness of pulsed MIG welds in HSLA steel', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[51] Norrish J, Slater G and Cooper P, 'Particulate fume distribution and breathing zone exposure in gas metal arc welding', *Proc Int Conf Health and Safety in Welding and Allied Processes*, 9–11th May 2005, Force Technology, Copenhagen, Denmark.

[52] Rodgers K J and Lochhead J C, 1987 'Self-shielded flux cored arc welding – the route to good fracture toughness', *Weld J*, July.

[53] Sandham J, 1987 'A comparative study of synergic pulsed MIG and tubular electrode GMAW, MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[54] Widgery D J, 1988 'Flux-cored wire: an update', *Weld Metal Fabric*, **56**(3).

[55] Yamamuchi N and Taka T, 1979 'TIG arc welding with hollow tungsten electrodes', *Int Inst Weld Doc*, 212-452-79.

[56] Al-Rawe A, 1991 Welding and Joining Technology, *MPhil*, SIMS, Cranfield Institute of Technology.

[57] Lancaster J F, 1987 *The Metallurgy of Welding*, 4th edn, London: Allen and Unwin.

[58] Allum C J, 1987 'Nitrogen absorption from welding arcs', *Int Inst Weld Doc*, 212-659-86.

[59] Norrish J and Alfaro S A, unpublished.

[60] Norrish J, Hilton D E and Mistry H R, 1986 'The effect of shielding gas composition in the MAG welding of line pipe', Proc 3rd int conf on *The Welding and Performance of Pipelines*, The Welding Institute, London, 18–21 November, paper 19.

[61] Stenbacka N and Svennson O, 1987 'Some observations of pore formation in gas metal arc welding', *Scand J Metall*, **16**.

[62] Scheibner P, 1979 'Results of investigations on the formation of spatter during metal active gas arc welding in the GDR', *Int Inst Weld Doc*, XII-B-271-79.

[63] Norrish J, 1974 'High deposition MIG welding with electrode negative polarity', Proc 3rd conf on *Advances in Welding Processes*, Cambridge: The Welding Institute, paper 16.

[64] Waering A J, 1989 'Cast to cast variation in austenitic stainless steel', MSc Thesis, Cranfield Institute of Technology.

[65] Hilton D E, 1982 'Helium argon mixtures prove more economic than argon for aluminium welds', *Weld Metal Fabric*, June.

[66] Kennedy C R, 1970 'Gas mixtures for welding', Aust Welding J, September.

[67] Stenbacka N, 1990 'Shielding gas and cored wire welding characteristics – weld metal mechanical properties', *AGA AB Innovation*.

[68] Johnson K I *et al.*, 1979 'MIAB welding – principles of the process', *Metal Construct* **11**(11).

[69] Patchett B M, 1978 'MIG welding of aluminium with an argon chlorine gas mixture', *Metal Construct*, **10**(10).

[70] Bicknell A C and Patchett B M, 1985 'GMA welding of aluminium with argon/freon shielding gas mixtures', *Weld J*, May.

[71] Heiple C R and Burgardt P, 1985 'Effects of SO_2 shielding gas additions on GTA weld shape', *Weld J*, June **64**, 159s–162s.

[72] Stenbacka N, 1989 'Reduction of ozone using Mison shielding gases – a few basic facts', *AGA AB Innovation*.

[73] Anon, 1990 'The problem of ozone in TIG welding', *AGA Gas Div Rep*, GM 1 16e, AGA, Sweden.

[74] Anon, 1990 'Facts about: ozone reduction with Mison shielding gases', *AGA Rep*, AGA, Sweden.

[75] Beck Hansen E, 1988 *Emissions of Fume, Ozone and Nitrous Gases During MAG Welding of Low Alloy Steel and Stainless Steel, 1987* Appendix with results of MAG welding with shielding gas $75Ar/25CO_2$ and Mison 25, The Danish Welding Institute, Copenhagen.

[76] Imaizumi H and Church J, 1990 'Welding characteristics of a new welding process', T.I.M.E. process', *Int Inst Weld Doc*, XII-1 199-90.

[77] Kirkpatrick I, 1989 'Welding with lasers', *Weld Metal Fabric*, August/September.

[78] Norris I M, 1988 'Optimisation of gas jet plasma control system for laser welding with a 10 kW CO_2 laser', *Weld Inst Res Rep*, TWI 368/1988.

[79] Brown M J, 1976 'Initiation of gas tungsten arcs by high voltage DC', *Weld Inst Res Rep*, 31/76/p.

[80] Biegelmeier G, 1985 *Effects of Current Passing Through the Human Body and the Electrical Impedance of the Human Body*, Berlin, VDE.

[81] Edberg H, 1988 'Improved touch starting techniques for TIG welding', *Metal Construct*, **20**(3).

[82] Nixon J H, 'TIG touch striking trials', *Private Communication*.

[83] Melton G B and Street J A, 1982 'Piezoelectric techniques for the initiation of TIG arcs', *Weld Inst Res Bull*, **23**(2).

[84] Melton G B, 1980 'Initial current characteristics of welding sets for gas tungsten arc welding', *Weld Inst Res Rep*, 7729.01/80/240.2.

[85] Goldman K, 1965 'An evaluation of electrodes for DC TIG welding', *BOC Ltd Internal Rep*.

[86] Masumoto I, Matsuda F and Ushio M, 1988 'Development and application of new oxide activated tungsten electrodes in Japan, *Int Inst Weld Doc*, XII-1047-87.

[87] Rudaz A, 1979 'Summary report on the use of pulsed currents in the TIG process', *Int Inst Weld Doc*, XII-F-201-79 (also published in *Weld World*, **18**(3/4)).

[88] Boughton P and Males B O, 1970 'Penetration characteristics of pulsed TIG welding', *Weld Inst Res Rep*, R/RB/P43/70.

[89] Shimada W and Gotoh T, 1976 'Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process', *Int Inst Weld Doc* XII-628-76.

[90] Grist F J, 1975 'Improved lower cost aluminium welding with solid state power source', *Weld J*, **54**(5).

[91] Maruo H and Hirata Y, 1986 'Rectangular wave AC TIG welding of aluminium alloy', *International Institute of Welding Document* 212-647-86.

[92] Tomsic M J and Barhorst S W, 1983 'Applications of keyhole plasma arc welding of aluminium, GTAW cathode etching of aluminium tubes and dabber TIG process', Proc 31st *ann conf of the Australian Welding Institute*, Sydney, 16–21 October 1983).

[93] Manz A F, 1977 'Hot wire welding and surfacing techniques', *Weld Res Council Bull*, AWS, Miami.

[94] Saenger J F and Manz A F, 1968 'High deposition gas tungsten arc welding', *Weld J*, May.

[95] Wright J P, 1989 'High frequency phase controlled power regulator for hot wire TIG welding', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[96] Schultz J P, 1980 'New possibilities in plasma-arc and dual shielding gas TIG welding', Conf on *Welding Fabrication and Surface Treatment*, Singapore 15–18 July, Singapore Welding Society.

[97] Richardson I M, 1989 'Plasma welding – the current status', *Weld Metal Fabric*, **57**(5).

[98] Woodford D and Norrish J, 1975 'Progress in the application of the plasma process', The Welding Institute Conf *Exploiting Welding in Production Technology*, London, 22–24 April.

[99] Wealleans J W and Allen B, 1969 'Towards automating the TIG process', *Weld Metal Fabric*, March.

[100] Anderson J E and Yenni D M, 1970 'Multi-cathode gas tungsten arc welding', Union Carbide ref. 52-538, *Weld J*.

[101] Lucas W and Howse D 1966 Activating flux – increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes, Weld Metal Fabric, January 11–17.

[102] Savage W F, Nippes E F and Agusa K, 1979 'Effect of arc force on defect formation in GTA welding', *Weld J*, July.

[103] Goldman K, 1963 'Electric arcs in argon:heat distribution', *Br Weld J*, July.

[104a] Mills K C and Keene B J, 1989 'The factors affecting variable weld penetration', Int Inst Weld Study Group 212, August.

[104b] Mills K C and Keene B J, 1990 *Int Mater Rev*, **35**(4).

[105] Keene B J, 1988 'The effect of thermocapillary flow on weld pool profile', *NPL Rep*. DMA(A) 167, Teddington, UK, National Physical Laboratory.

[106] Waering A J, 1988 'Control of TIG welding in practice', Seminar *Who's in Control*, Cranfield Institute of Technology, May 1988.

[107] Smal C, 1988 'Oscillations in voltage and spectral radiation signals from GTAW arcs', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[108] Pratt N, 1989 'Fluctuations in voltage and light signals from GTAW arcs', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[109] Needham J C, Cooksey C I and Milner D R, 1960 'The transfer of metal in inert gas shielded arc welding', *Weld J*, **7**.

[110] Balraj V and Norrish J, 1987 Pulsed MIG welding of stainless steel with controlled

metal transfer, *Proc Ann Indian Institute of Welding* (Madras; Indian Institute of Welding) pp. 893–907.

[111] Ma J, 1982 'Metal transfer in MIG welding', PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.

[112] Norrish J and Ward B, 'Metal transfer analysis of FCAW using an Imacon camera', unpublished.

[113] Norrish J and Richardson I M, 1988 'Metal transfer mechanisms', *Weld Metal Fabric*, **56**(1).

[114] van Adrichem T J, 1969 'Metal transfer', *Int Inst Weld Doc*, 212-171-69.

[115] Anon, 1976 'Classification of metal transfer', *Int Inst Weld*, XII-636-76.

[116] Norrish J, 2003 'A review of metal transfer classification in arc welding', IIW Document XII-1769-03, July, IIW, Annual Assembly, Commission XII, Romania.

[117] Nunes J, 1982 MSc Thesis, Cranfield Institute of Technology.

[118] Norrish J, 1974 'High deposition MIG-welding with electrode negative polarity', Proc 3rd. Conf on *Advances in Welding Processes*, Cambridge: The Welding Institute, paper 16.

[119] Stevenson A W, 1988 'Analysis of burn-off behaviour of flux cored arc welding', MSc Thesis, Cranfield Institute of Technology.

[120] Bucknall P W, 1990 'Influence of power source dynamics on the burn-off rate during pulsed GMA welding', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[121] Chang C H, 1989 'Investigation of arc characteristics and metal transfer for flux cored electrode in GMA welding', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[122] Blackman S and Norrish J, 1988 'Pulsed MIG welding with gas shielded flux cored wires. Synergic MIG update', *Weld Metal Fabric*, April.

[123] Boughton P and MacGregor G, 1974 'Control of short circuiting in MIG-welding', *Weld Res Int*, **1.4**(2).

[124] Ogasawara *et al.*, 1987 'A power source for gas metal arc welding with new current waveforms', *Weld J*, March, 57–63.

[125] Stava A, 1993 Low spatter welding, *Weld J*, **72**(1).

[126] Ou Z, Wuang Y, Ushio M and Tanaka M, 1999 New concept for the characteristic of an arc welding power source, Report II – New development of arc control system for CO_2 welding, *Trans JWRI*, **28**(1).

[127] Cuiuri D, Norrish J and Cook C, 2000 Droplet size regulation in the short circuit GMAW process using a current controlled weaveform, AWS Conference, GMA welding for the 21st Century, Orlando, Florida, December.

[128] Jingzhong W, Ddojun C, Xintao W and Jida X, 1984 Study on the dynamic process of half-cycle pulsed wire feeding CO_2 welding, *Proc. International Conference on Quality and Reliability in Welding*, 6–8 September 1984, Hangzhou, China, XVII-1-1 to XVII-1-6.

[129] Yongui J, Ganghua Y, Xintao W and Minghong L, 1984 A new welder for CO_2 welding with pulsed wire feeding, *Proc. International Conference on Quality and Reliability in Welding*, 6–8 September, Hangzhou, China, XII-3-1 to XII-3-6.

[130] Qilong W, Shuyan Y, Zeping Z and Weiyan J, 1984 'Short-circuit CO_2 welding with combined control of current wave and wire feed', *Proc International Conference on Quality and Reliability in Welding*, 6–8 September, Hangzhou, China, ppXII-1-1 to XII-1-6.

[131] Huismann G, 2000 Direct control of the material transfer: The controlled short-circuiting (CSC) – MIG process, *Proc. Gas Metal Arc Welding for the 21st*

Century Conference (American Welding Society), 6–8 December 2000, Orlando, Florida, USA, 165–172.

[132] Manz A F, 1968 'One knob welder', *Welding J*, **47**(9).

[133] Norrish J, 1972 'Developments in MIG welding of sheet steel and strip', *Sheet Metal Industries*, Proc conf on *Sheet Steel and Strip Welding*, Kenilworth, England, 15–17 March Birmingham: The Welding Institute, p 6.

[134] Amin M and Watkins P V C, 1977 'Synergic pulse MIG welding', *Weld Inst Res Rep*, 46/1977/P.

[135] International Institute of Welding, 1985 'Synergic power supplies – classification and questionnaire', *Int Inst Weld Doc*, XII-905-85.

[136] Lowery J, 1975 'Electronic control systems in welding', *Electro-Technol*, **98**(10).

[137] Amin M and Naseer A, 1987 'Synergic control in MIG welding, 2 – Power–current controllers for steady DC open arc operation', *Met Constr*, **19**(6).

[138] Lesnewich A, 1958, Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, Parts 1 and 2, *Weld J*, August, 343s–353s, September 1958, 418s–425s.

[139] Norrish J, 1974, High deposition MIG welding with electrode negative polarity, Proc 3rd Conference on Advances in Welding Processes, TWI, Cambridge, Paper 16.

[140] Halmoy E, 1991, The "T.I.M.E" Welding Method compared with GMAW, IIW Doc. XXII-1248-91, Commission XII, IIW annual assembly, The Hague.

[141] Stenbaka N, 1989, Rapidarc and Rapidmelt processes, AGA technical report, AGA, Sweden.

[142] Blackman S J, 2001 High speed tandem GMAW, Proc. Conf. Recent Developments and Future Trends in Welding Technology, Cranfield University, UK, September.

[143] Quigley M B C, 1986 'High power density processes', *The Physics of Welding*, Oxford: IIW/Pergamon, p 306.

[144] Ireland C L M, 1990 'Current state of power laser technology and future trends', *Manufacturing Technology – Europe*, 1990.

[145] Metcalfe J C and Quigley M B C, 1975 'Heat transfer in plasma arc welding', *Weld J*, March.

[146] Woodford D R, 1972 'Plasma welding data sheets', *BOC Guidance Notes*.

[147] Bland J, 1973 *Recommended Practices for Plasma-arc Welding*, AWS C5.1-73, American Welding Society, Miami.

[148] Pinfold B E, 1974 'Plasma arc welding – part 4. Welding technology data sheet', *Weld Metal Fabric*.

[149] Lavigne D, Van Der Have P and Maksymowicz M, 1988 'Automatic plasma arc welding', *Join Mater*, July.

[150] Zhou Yin, 1985 'The influence of focusing gas flow on working stability of high capacity plasma torch', *Trans China Weld Inst*, **6**(2).

[151] Pattee H E, Meister R P and Monroe R E, 1968 'Cathodic cleaning and plasma arc welding of aluminium', *Weld J*, May.

[152] Smart M D and Pinfold B E, 1971 'Comparison of modulated and unmodulated current plasma welding', *Weld Metal Fabric*, September.

[153] Lucas W, 1978 'Pulsed plasma welding', *Weld Inst Res Bull*, **19**.

[154] Narita K *et al.*, 'Plasma arc welding of pipelines: a study to optimise welding conditions for horizontal fixed joints of mild steel pipes', *Int J Press Vessels Piping*.

[155] Miller H R and Filipski S P 1966 'Automated plasma arc welding for aerospace and cryogenic fabrications', *Weld J*, June.

[156] Woolcock A and Ruck R J, 1978 'Keyhole plasma arc welding of titanium plate', *Metal Construct*, December.

[157] Wu Chih Chiang and Pinfold B E, 1979 Operational envelopes for plasma keyhole welding of titanium', *Weld Metal Fabric*, November.

[158] Tomsic M J and Barhorst S W, 1983 'Applications of keyhole plasma arc welding of aluminium, GTAW cathode etching of aluminium tubes and dabber TIG process', *Proc 31st Ann Conf of The Australian Welding Institute*, Sydney, 16–21 October.

[159] (After Hill M *et al.*, 1990 10 kW CO_2 laser welding of a high-yield-strength steel 2nd Int. Conf. on Power Beam Technology, Stratford-upon-Avon, 23–26 September.

[160] Herziger G, 1985 'The influence of laser induced plasma on laser materials processing', *Annual Review of Laser Processing, Industrial Laser Handbook.*

[161] Matsunawa A, Yoshida H and Katayama S, 1985 'Beam plume interaction in pulsed YAG laser processing', *Int Inst Weld Doc*, 212-617-85.

[162] Megaw J H P C, Hill M and Johnson R, 1981 'Laser welding of steel plates with unmachined edges', *UKAEA Report*, CLM-P649.

[163] Banas C M, 1979 *US Patent No 4152575.*

[164] Arata Y *et al.*, 1985 'Fundamental phenomena in high power CO_2 laser welding', *Trans JWRI*, **14**(1).

[165] Shinmi A *et al.*, 1985 'Laser welding and its applications for steel making process', *Laser Welding, Machining and Materials Processing, Proc Int Conf on Applications of Lasers and ElectroOptics, ICALEO'85*, IFS Publications.

[166] Anon, 1989 'Laser welded parts give greater speed and accuracy', *Eng Lasers*, October.

[167] Roessler M D, 1990 'A fresh look at lasers in automotive applications', *Ind Laser Rev*, February.

[168] Weedon T M, Burrows G and Thompson P G, 'Nd-YAG lasers in car body cutting and welding', *ISA TA Symp, Florence, 1989*, Rugby, UK: Lumonics.

[169] Metzbower E A, 1983 'Laser welding of mild steel at NIROP', Minneapolis, USA, *Metal Construct*, **15**(10).

[170] Mazumder J and Steen W M, 1980 'Welding of Ti-6A1-4V by a continuous wave CO_2 laser', *Metal Construct*, **12**(9).

[171] Matsuda J *et al.*, 1988 TIG or MIG arc augmented laser welding of thick mild steel plate', *Join Mater*, **1**(1).

[172] Steen W M and Eboo M, 1979 'Arc augmented laser welding', *Metal Construct*, **11**(7).

[173] Hetcht J, 1990 *Understanding Lasers* Indiana, Howard W Sams.

[174] Sato *et al.*, 1989 'Experience with CO lasers', Proc 6th int conf *Lasers in Manufacturing*, May 1989.

[175] Mulima J, Hermans M, Norrish J and Di Pietro P, 2006 The Influence of High Power Diode Laser In Hybrid Laser-Controlled Dip Transfer GMA Welding, Proc. Laser Institute of America, Picalo Conference, Melbourne Australia, April.

[176] Howse D S, Scudamore R J and Booth G S, 2005 *Yb Fibre Laser/MAG Hybrid Processing for Welding of Pipelines*, International Institute of Welding, IIW Doc. IV-880-05.

[177] Quigley M B C, 1986 'High power density welding', *The Physics of Welding*, Oxford, IIW/Pergamon, p 306.

[178] Benn B, 1988 'Joining technology at Rolls Royce PLC, Bristol', *Weld Metal Fabric*, **56**(6).
[179] Nightingale K R, 1983 'Electron beam welding of copper and its alloys', *Weld Inst Res Bull*, **24**(1).
[180] Russell J D, 1981 'Electron beam welding – a review', *Metal Construct*, **13**(7).
[181] Malin V Y, 1983 'The state-of-the-art of narrow gap welding *Weld J*, **62**(6).
[182] Foote W, 1987, PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.
[183] Farish E, 1989 'Modelling the GTAW process with cold wire addition', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.
[184] Randall M D and Nelson J W, 1979 'CRC automatic welding system', Proc Conf *Recent Developments in Pipeline Welding*, Cambridge, The Welding Institute.
[185] Meister R P *et al.*, 1966 'Narrow gap welding process', *Br Weld J*, **13**(5).
[186] Modenesi P, 1990 'Statistical modelling of narrow gap gas metal arc welding process', PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.
[187] Kimura S *et al.*, 1979 'Narrow gap gas metal arc welding process in the flat position', *Weld J*.
[188] Nakayama M and Arikana M, 1975 'Development and application of narrow gap arc welding processes in Japan', *Weld World*, **13**(9/10).
[189] Alfaro S 1989 'Mathematical modelling in narrow gap submerged arc welding', PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.
[190] Alfaro S C A and Apps R L A, 1989 'Mathematical modelling of narrow gap submerged arc welding', Proc int conf on *Joining of Materials, JOM-4*, Helsingor, Denmark, 19–22 March.
[191] de Altamer A, 1980 'Submerged arc narrow gap welding', *Metal Construct*, **12**(10).
[192] Hirai *et al.*, 1981 'Application of narrow gap submerged arc welding to fabrication of 2.25%Cr–1%Mo forged steel heat exchangers', *Int Inst Weld Doc*, XIIA-009-81.
[193] Lochead J C, 1983 'Narrow gap welding', Proc Joint Conf South African Institute of Welding and Institute of Mechanical Engineers, *Welding and the Engineer, the Challenge of the 80s*.
[194] Kennedy N A, 1986 'Narrow gap submerged arc welding of steel; Part 1 Applications', *Metal Construct* **18**(11).
[195] Ellis D J, 1988 'Mechanised narrow gap welding of ferritic steel', *Join Mater*, **1**(2).
[196] Curtis G, Lovegrove G L and Farrar R A, 1990 'WASPS' – an advisory system for welding process selection', *Weld Metal Fabric*, **58**(1).
[197] Hicks J, 1979 A *Guide to Designing Welds*, Cambridge, Abington Publishing.
[198] British Standards Institution, 1986 BS 4871, Specification for approval testing of welders working to approved welding procedures; 1986 BS 4872, Specification for approval testing of welders when welding procedure approval is not required.
[199] Queen D M, 1989 'The evaluation and implementation of a computerised welding procedure database management system', Shell Expro.
[200] Robinson P, Private communication.
[201] Smith D S, 1988 'Control of MMA welding in practice – a user's view', *Who's In Control* seminar, Cranfield Institute of Technology, 25–26 May.
[202] Smith C J, 1988 'The calibration of welding equipment', *Who's in Control* seminar, Cranfield Institute of Technology, 25–26 May.

[203] Norrish J, 1988 'Computer based instrumentation for welding', Proc Conf *Computer Technology in Welding*, The Welding Institute, Cambridge, 8–9 June.

[204] Nixon J H N, 19XX *Instrumentation for Arc Welding*, Cranfield, Cranfield Institute of Technology.

[205] Chawla K C, 1991 *A General Purpose PC Based Welding Data Logger*, Cranfield, Cranfield Institute of Technology.

[206] Robinson P and Rogers P F, 1989 Measurement of welding current, *Join Mater*, July **2**(7).

[207] Kuszleyko R, 1979 'An objective solution of the welding process stability evaluation', *Int Inst Weld Doc*, XII-F208-79.

[208] Duncan A, 1980 'Evaluation of power sources for manual metal arc welding by use of stability criteria', MSc thesis, University of Aston, Birmingham.

[209] Carrer A, 1960 'Dynamic behaviour of DC generators for arc welding', *Br Weld J*, January.

[210] Buki A and Gorenshtein I M, 1967 'The stability and self adjustment of metal deposition with short circuits of the arc gap', *Autom Weld*, **11**.

[211] Lucas W and Butler M, 1981 'An evaluation of minicomputer techniques for data acquisition and analysis in arc welding process research', *Weld Inst Res Rep*, 134/1981.

[212] Batson M S, 1981 'Effect of gas composition on arc stability during the short circuit welding of stainless steel', MSc thesis, University of Aston, Birmingham.

[213] Norrish J, Holmberg L and Hilton D E, 1989 'Optimisation of argon, oxygen, carbon dioxide gas mixtures for the GMA welding of plain carbon steel', Proc Int Conf on the Joining of Materials, JOM-4, Helsingor, Denmark 19–22 March.

[214] Weinschenk H E and Schellhase M, 1979 'Statistical analysis of arcing voltage in the CO_2 shielded welding process', Proc Conf *Arc Physics and Weld Pool Behaviour*, The Welding Institute, London, 8–10 May.

[215] Gupta S R, Gupta P C and Rehfeldt D, 1988 'Process stability and spatter generation during dip transfer in MAG welding', *Int Inst Weld Doc*, 212-710-88.

[216] Shinoda T, Kaneda H and Takeuchi Y, 1989 'An evaluation of short circuiting phenomena in GMA welding', *Weld Metal Fabric*, **57**(10).

[217] Mita T, Sakabe A and Yokoo T, 1988 'Quantitative estimates of arc stability for CO_2 gas shielded arc welding', *Weld Int*, (2).

[218] Budai P, 1988 'Measurement of drop transfer stability in weld processes with short circuiting drop transfer', *Int Inst Weld Doc*, 212-711-88.

[219] Andrews D R and Broomhead J H W, 1975 'Quality assurance for resistance spot welding', *Weld J*, June.

[220] Broomhead J H W and Dony P H, 1990 'Resistance spot welding quality assurance', *Weld Metal Fabric*, **58**(6).

[221] Rashid O A F, Hodgson D C and Broomhead J H W, 1983 'A microprocessor based monitor for the resistance welding of mild steel and aluminium', Proc Int Conf *Development and innovation for improved welding production*, Birmingham, UK, September 1983.

[222] Janota M and Kuban J, 1985 'Adaptive systems of process control for spot welding robot cells', Proc Conf *Automation and Robotisation in Welding and Allied Processes*, Strasbourg, Oxford: Pergamon.

[223] Crookall J R and Philpott M L, 1984 'Direct arc sensing adaptive quality control of MIG welding robots', Proc 3rd *SERC Robotics Initiative Conference*, University of Surrey.

[224] Philpott M L, 1986 'Direct arc sensing for robot arc welding, PhD thesis, Cranfield Institute of Technology.
[225] Needham J C and Bourton M, 1988 'Monitoring and control techniques for arc welding', *Who's in Control* seminar, Cranfield Institute of Technology, 25–26 May.
[226] Brown K W 1988 'Programmable error monitors – a new breed of QA watchdogs', *Weld Inst Res Bull*, **29**(3/4).
[227] Philpott M L and Norrish J, 1988 'Process monitoring and statistical process control', *Who's in Control* seminar, Cranfield Institute of Technology, 25–26 May 1988.
[228] Papritan J C and Helzer S C, 1991 'Statistical process control for welding', Welding J, **70**(3).
[229] Thomas M A, 1987 'The implementation and benefits of statistical process control', *Qual Assur*, **13**(1).
[230] Shewhart W A, 1931 *Economic Control of Quality of Manufactured Products*, New York: Van Nostrand.
[231] Blackmon D R and Kearney F W, 1983 'A real time quality approach to quality control in welding', *Weld J* August.
[232] Anon, 1989 'Destructive testing of wheel weldments cut in half', *Weld J*, April.
[233] Reilly R, 1991 'Real-time weld quality monitor controls GMA welding', *Weld J*, **70**(3).
[234] Evans C R C, 1988 'Monitoring the welding process', *The Fabricator*, November, Rockford, IL, FMA.
[235] British Standards Institution, 1984 BS 5750 Part 1, Quality systems – Specification for design, manufacture and installation. Clause 4.9.2.
[236] Ogata *K*, 1984 *Modern Control Engineering*, Prentice Hall.
[237] Astrom K J and Wittenmark B, 1980 *Adaptive Control*, Addison Wesley.
[238] Richardson R W, 1986 'Robotic weld joint tracking systems – theory and implementation methods', *Weld J*, November.
[239] Philpott M L and Crookall J R, 1986 'Seam tracking by direct arc sensing', *Manufacturing Systems Engineering*, Cranfield Institute of Technology.
[240] Skjolstrup C E, 1990 'The introduction of robots in a shipyard', *Weld Rev*, **9**(1).
[241] Kohn M L *et al.*, 1985 'A robotic cell for welding large aluminium structures using a two-pass optical system', Proc First Int Conf on *Advanced Welding Systems*, The Welding Institute, London, 19–21 November.
[242] Hughes R, 1985 'Arc guided robot plasma welding', Proc First Int Conf on *Advanced Welding Systems*, The Welding Institute, London, 19–21 November, paper 17.
[243] Nomura H, *et al.*, 1984 'The development of automatic TIG welding process with seam tracking', Proc Int Conf on *Quality and Reliability* in *Welding*, Hangchou, China, 6–8 September.
[244] Tan C and Lucas J, 1986 'Low cost sensors for seam tracking in arc welding', Proc 1st Int Conf *Computer Technology in Welding*, The Welding Institute, London, 3–5 June.
[245] Drews P and Starke G, 'Development approaches for advanced adaptive control in automated arc welding', Proc Conf *Automation and Robotisation in Welding and Allied Processes*, Strasbourg 1985, Oxford, Pergamon.
[246] Agapakis J E, *et al.*, 1986 Joint tracking and adaptive robotic welding using vision sensing of the weld joint geometry', *Weld J*, November.

[247] Richardson R W *et al.*, 1984 'Coaxial arc weld pool viewing for process monitoring and control', *Weld J*, **63**(3).

[248] Richardson R W and Corardy C C, 1990 'Coaxial vision based GMAW: initial design and test. Research report summary', *Edison Weld Inst Insights*, **4**(1).

[249] Stroud R R and Harris T J, 1990 'Seam tracking butt and fillet welds using ultrasound', *Join Mater*, **2**(1).

[250] Anon, 1986 *Composition Controlled Sensing Technology*, Rockville, MD, U-Weld Automation.

[251] Habil F, Erdmann-Jesnitzer E, Feustel E and Rehfeldt D, 1966 'Acoustic investigations of the welding arc', *Int Inst Weld Doc*, 212-86-66.

[252] Rommanenkov E I *et al.*, 1976 'Control of arc length on the basis of its spectral radiation', *Weld Prod*, 9.

[253] Boughton P, Rider G and Smith C J, 1978 'Feedback control of weld penetration', Proc Conf *Advances in Welding Processes*, Cambridge, UK.

[254] Peters C N D, 1987 'The use of backface penetration control methods in synergic pulsed MIG welding', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[255] Watson D G, 1986 'The use of backface penetration control methods in synergic pulsed MIG welding', MSc thesis, Cranfield Institute of Technology.

[256] Naseer A and Lucas W, 1988 'Evaluation of a video system for control of weld bead penetration in TIG welding', *Weld Inst Res Rep* 357/1988.

[257] Salter R J and Deam R T, 1987 'A practical front face penetration control system for TIG welding', Proc Conf *Developments in Automated and Robotic Welding*, Welding Institute, London, 17–19 November.

[258] Madigan R B, *et al.*, 1986 'Computer based control of full penetration GTA welding using pool oscillation sensing', Proc Conf *Computer Technology in Welding*, Welding Institute, London.

[259] Lucas W and Mallett R S, 1975 'Automatic control of penetration in pulsed TIG welding', *Weld Instit Res Rep*, P/72/75.

[260] Rokhlin S 1 1989 'In process radiographic control of arc welding', *Mater Eval* **47**(3).

[261] Boillot J P *et al.*, 1985 'Adaptive welding by fibre optic thermographic sensing: an analysis of thermal and instrumental considerations', *Weld J*, July.

[262] Bangs R E, 1986 'AL in the development of adaptive controls for fusion welding', SME Conf *Ultratech-Artificial Intelligence*, Long Beach, CA, 22–25 September 1986.

[263] Wareing A J, Murdock J and Sullivan P D, 1988 'Fabricating stainless steel cell liner plates. Synergic MIG update supplement', *Weld Met Fabric*, April.

[264] Anon, 1987 'Simple mechanisation enhances shipbuilding productivity', *Met Construction*, **19**(3).

[265] Anon, 1990 'Automated welding with columns, booms and tractors', *Weld Met Fabric* **58**(2).

[266] Reeves K D and Miller C J, 1985 'The development of a remotely controlled welding system for the site welding of AGR fuel standpipe closures', Int Conf on *Advanced Welding Systems*, Welding Institute, London, November 1985.

[267] Carrick L, Hick A B, Salmon S and Wareing A J, 1985 'A new welding technique for stainless steel pipe butt welds', *Met Constr*, **17**(6).

[268] Halford P, 1987 Productivity and Quality Benefits from Improved Pipework Installation Techniques with Reference to The Vitrification Plant, British Nuclear Fuels.

[269] UK Patent 8411823.
[270] Adams D, 1979 *The Hitchhikers Guide To The Galaxy*, Pan.
[271] Archer J R and Blenkinsop P T, 1986 'Actuation for industrial robots', *Proc Inst Mech Eng*, **200**(B2).
[272] Kunzig L A, *et al.*, 1985 'Flexible resistance welding line of side panels in railway wagon assembly', Int Conf on Advanced Welding Systems, Welding Institute, London, November 1985.
[273] Various authors, *Met Constr*, **16**(4), April 1984.
[274] Hanley T E, 1986 Putting robotic welding into practice – the Land Rover chassis line, *Met Constr*, **18**(4), April.
[275] Anon, 1987 Developments in arc welding automation, *Met Constr*, **19**(9), September.
[276] Anon, 1986 Turbine manufacturer makes move to robotics. *Weld J*, November.
[277] Flanigan L, 1986 Factors influencing the design and selection of GTAW robotic welding machines for space shuttle main engines, *Weld J*, November.
[278] 'Tipo – the product of the system' *Fiat Publication*, 10067-1/88, Turin: Fiat, 1988.
[279] Wright R R, 1990 'The modular approach to automated and mechanised welding', *Weld and Met Fabric*, March.
[280] Knagenhjelm H O, Morris A W, Pinches C A, Bellis G A and Gjermundsen K, 1985 'The development of a mechanised welding system for deep waters', Int Conf on *Advanced Welding Systems*, Welding Institute, London, November.
[281] Berge J O, Habrekke T and Knagenhjelm H O, 1991 'Automation in underwater hyperbaric pipeline welding', *OMAE Conf*, Stavanger, Norway, 23–28 June, paper ASME-91-844.
[282] Smith C J, Morgan-Warren E J and Salter R, 1987 'The development of a remote tube welding system for sealing containers', Proc Conf *Developments in Automated and Robotic Welding*, Welding Institute, London, 17–19 November.
[283] Smith C J, Morgan-Warren E J and Salter R, 1987 'The development of a microprocessor controlled MIG welding system for joining toxic components', Proc Conf *Developments in Automated and Robotic Welding*, Welding Institute, London, 17–19 November.
[284] Smith R and Williams A, 1985 'Flexible system expands possibilities for robotic welding', *Met Constr*, **17**(5).
[285] Pekkari B, 1989 'Towards FMS: developments in arc welding processes and equipment for robotic applications', *Exploiting Robots in Arc Welded Fabrication*, The Welding Institute, p 119.
[286] Smith P A, 19XX 'An example of FMS robot arc welding', *Exploiting Robots in Arc Welded Fabrication*, The Welding Institute.
[287] Skjolstrup C E, 1990 'The introduction of robots in a shipyard', *Welding Rev* **9**(1).
[288] Ribeiro A, Norrish J and McMaster R, 1994 Practical case of Rapid Prototyping using gas metal arc welding, TWI–Fifth International conference on Computer Technology in Welding, 15–16 June 1994, Paris, France, paper 55.
[289] Nicholson A, 2002 *In-situ* weld repair of hydro turbine runners – A study of current practice and the feasibility of automation, IIW Asian Pacific International Congress, Singapore, October.
[290] Norrish J and Gourd L M, 1987 'Evaluation of opportunities for automation in arc welding – a training package', Proc Conf on *Developments in Automated and Robotic Welding*, Welding Institute, London, 17–19 November.

[291] Fekken U, 1987 'Straightforward solutions to straightforward automatic welding jobs', Proc Conf on *Developments in Automated and Robotic Welding*, Welding Institute, London, 17–19 November.

[292] Tanner W R, 1978 *Selling the Robot: Justification for Robot Installations*, Michigan: Society of Manufacturing Engineers.

[293] Maiin V, 1986 'Problems in the design of integrated welding automation – Part I: Analysis of welding-related operations as objects for welding automation', *Weld J*, November.

[294] Anon, 1987 'UK robot take up falls with support', *Eng News*, (24), February.

[295] Challis H, 1987 'Robots out of Wonderland', *Eng News*, (32), October.

[296] Huang P Y and Sakurai M, 1989 'An assessment of factory automation in Japan: a general mail survey', *Manuf Rev*, **2**(3).

[297] Davis K and Martin R, 1990 *Industrial Society Meeting*, February 1990, in 'Automation is setting worker against worker', *Guardian*, 23 February.

国际视野　科技前沿

ISBN 978-7-111-30402-9
封面设计：鞠杨
定价：48.00元

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821
邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

上架指导：工业技术／机械工程／焊接

